

Sondierungen an der Turmnordwand der Runneburg in Weißensee

Berichte zur Denkmalpflege-Forschung

Dipl.-Ing. H. Wigger

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

April 1995

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Pockelsstraße 32
D-30106 Braunschweig

**Gefördert durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie
Vorhaben BAU 7025 B**

1	Einleitung und Problemstellung	3
2	Unterlagen	5
3	Baugeschichte und Zustand des sondierten Mauerwerkes.....	6
4	Sondierungsverfahren und Ergebnisse	9
4.1	Körperschallmessungen	10
4.1.1	Verfahren und Einflußgrößen	10
4.1.2	Ergebnisse	11
4.2	Georadarmessungen.....	14
4.2.1	Verfahren und Einflußgrößen	14
4.2.2	Ergebnisse	15
4.3	Bohrlochendoskopie	16
4.3.1	Verfahren und Einflußgrößen	16
4.3.2	Ergebnisse	17
4.3.2.1	Baustoffuntersuchungen	19
4.4	Bohrkernentnahme	21
4.4.1	Verfahren und Einflußgrößen	21
4.4.2	Ergebnisse	21
4.4.2.1	Baustoffuntersuchungen	23
4.5	Vergleich der Sondierungsverfahren	23
5	Zusammenfassung und Ausblick	25

Anlagen

1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Historische Gebäude stehen in einem immer höheren Interesse der Öffentlichkeit. Bei jedem Gebäude steht die weitestgehende Erhaltung der Tragstruktur, der Materialien und der äußeren Form im Vordergrund.

Sind Sicherungs- und Erhaltungsmaßnahmen am Bauwerk erforderlich, sei es durch Veränderung der Tragstruktur, der Nutzung oder auch durch Witterungseinflüsse u.a.m., so sollten bzw. müssen solche Maßnahmen so schonend wie möglich durchgeführt werden. Um die notwendigen Eingriffe ins Bauwerk zu planen, sind genaue Kenntnisse der Tragkonstruktion und deren Materialien für den Ingenieur unerlässlich.

Untersuchungen in der Vergangenheit beschränkten sich auf die Oberfläche des Bauteils. Hieraus wurde auf das Innere des Bauteils geschlossen. Erfahrungen aus Sanierungsmaßnahmen früherer Zeit zeigten, wie wichtig der Aufschluß der inneren Struktur ist, um keine bösen Überraschungen zu erleben. Der Wunsch nach einem detaillierten Aufschluß des Baugefüges ist um so verständlicher, da durch eine genaue Analyse der Eingriff ins Bauwerk minimiert werden kann. Die Untersuchungsziele richten sich nach den jeweiligen Maßnahmen am Bauwerk. Zur Ermittlung von Schadensursachen sind ebenso Sondierungen erforderlich.

Um den Zustand eines Mauerwerkes zu erkunden, ist die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften sowie auch die Sondierung des inneren Gefüges und der Materialien des Mauerwerkes eine wichtige Untersuchungsaufgabe zur Vorbereitung einer Sanierungs- oder Sicherungsmaßnahme.

Als Sondierungsziele dienen folgende Gefüge- und Baustoffmerkmale:

- **Mehrschaligkeit des Gefüges**

Historisches Mauerwerk ist fast immer zwei- oder dreischalig ausgeführt worden. Die Mauerwerksschalen unterscheiden sich in der Steinbearbeitung, im Verband und im Mörtelanteil und weisen unterschiedliche mechanische Eigenschaften auf. Die Sondierung muß die Schalenanzahl ermitteln und den Verbund visuell unzugänglicher Schalen charakterisieren.

- **Schalendicke**

Der Schalenübergang bzw. -spalt muß im Mauerwerksprofil lokalisiert werden.

- Gefügehohlräume

Gefügehohlräume können durch Verdichtungsmängel bei der Herstellung und durch Mörtelauswaschungen, aber auch durch ehemalige Fenster- und Kaminöffnungen bedingt sein. Gefügehohlräume müssen in der Mauerwerksansicht und im Mauerwerksprofil lokalisiert werden.

- Identifizierung der Baustoffe

Die Sondierung muß Ergebnisse hinsichtlich der Verteilung der „Phasen“ Mörtel und Stein im Mauerwerksgefüge liefern. Ferner muß zwischen Mauermörtel und evtl. vorhandenem Injektionsmörtel unterschieden werden können. Die baustofftechnische Ansprache der Phasen ist i.d.R. nur an entnommenen Proben möglich.

- Feuchte- und Salzgehalt

Sondierungsziel ist im Idealfall die Angabe quantitativer Werte. Aber auch relative Aussagen zu horizontalen und vertikalen Feuchtegradienten können wichtige Hinweise auf Schadensursachen geben.

Die Endoskopie stellt ein zerstörungsarmes Verfahren zur Sondierung der Gefügemerkmale dar, wobei folgende Merkmale dokumentiert werden können: Mehrschaligkeit, Schalendicke, Schalenspalt und Gefügehohlräume. Da die Endoskopie eine visuelle Information liefert, ist eine getrennte Identifizierung der Einzelmerkmale möglich. Voraussetzung ist, daß der Betrachter über eine genügende Erfahrung verfügt. Die Endoskopie liefert nur begrenzt Baustoffmerkmale. An Bohrmehlproben werden Materialfeuchtigkeiten, Mörtelarten (Zement, Kalk, Gips) bestimmt. An den Materialproben können keine mechanischen Eigenschaften wie Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul ermittelt werden. Zur Ermittlung dieser Parameter und zur Schärfung ingenieurmäßiger Tragmodelle auf das vorhandene Mauerwerk ist die zerstörende Bohrkernentnahme notwendig.

Zerstörungsfreie Sondierungsverfahren wie Ultraschalltechnik und Georadar sind in den letzten Jahren stetig weiterentwickelt und vermehrt an historischem Mauerwerk eingesetzt worden. Das Meßprinzip beider Verfahren beruht auf der Dichtemessung durchschallter Körper. Da die Dichte von den genannten Gefüge- und Baustoffmerkmalen abhängig ist, kann von der Ultraschall- und Georadartechnik die Sondierung dieser Merkmale erwartet werden.

2 UNTERLAGEN

- [1] Stolle, T.; Jäger, H.; Baier, E.: Denkmalpflegerische Zielstellung der Runneburg in Weißensee, Kreis Sömmerda, Protokoll, 2.12.1993.
- [2] Stolle, T.; Kirchschrager, M.: Die Runneburg in Weißensee - eine mittelalterliche Pfalz der Thüringer Landgrafen (informeller Vorbericht). In: Burgen und Schlösser, 1991, Nr. Sonderheft, S. 4-14.
- [3] Stark, J.; Mielke, I.: BMFT-Pilotobjekt: Runneburg - Weißensee/Thüringen, 2. Zwischenbericht, Anamnesebericht, HAB Weimar, 31.12.1993.
- [4] Blum, R.; Rahm, U.: Bericht über Körperschall- und Georadarmessungen an der Nordwand des Burgfrieds der Runneburg in Weißensee/Thüringen, Laboratorium für Dynamik und Optik.
- [5] Stark, J.; Mielke, I.: Abschlußbericht über den Einsatz von Injektionsmörtel an der Runneburg im Zeitraum Juli bis Oktober 1992, HAB Weimar, 21.06.1993.
- [6] Königfeld, P.: Überlegungen zum Thema: Zerstörungsfreie / zerstörungsarme Untersuchungen an Kulturgut. In: Materialien zur Fort- und Weiterbildung: Bestandserfassung und Bestandsanalyse an Kulturdenkmälern, 1993, S. 7-9.
- [7] Hartmann, P.: Projektskizze für Forschung und Entwicklung im Rahmen der vom BMFT geförderten Denkmalpflege, Pilotobjekt: Die Runneburg in O-5237 Weißensee (Thür.) Teil 1, 1992.
- [8] Bernuth, W.; Pfirschke, H.; Vogler, W.-D.: Sanierungsbegleitende meßtechnische Untersuchungen am Turm der mittelalterlichen Runneburg in Thüringen. In: Meßtechnische Briefe 28, 1992, Nr. 2, S. 36-40.
- [9] Bücher, K.; Menge, J.: 1. Zwischenbericht (Bausicherung) Burg Runneburg in Weißensee, Architekten BDA Bücher und Menge, Seestraße 6, O-5237 Weißensee, 15.5.1992.
- [10] Bücher, K.; Menge, J.: Unterlagen zur Runneburg - Weißensee/Thüringen, Objektinspektion, Architekten BDA Bücher und Menge, 02.08.1993.
- [11] Baumgarten, H.; Kirchschrager, M.; Stolle, T.; Pohl, P.: Runneburg - Eine romanische Burganlage in Weißensee/Thüringen, Außergewöhnliche Sicherungen und Sanierungen. 1994.
- [12] Kahle, M.; Illich, B.: Einsatz des Radarverfahrens zur Erkundung von Struktur und Zustand historischen Mauerwerks, In: Bautechnik 7, S.: 342-353, Heft 7, 1992.
- [13] Blum, R.; Rahm, U.: Angebot über Körperschall- und Georadarmessungen an der Nordwand des Burgfrieds der Runneburg in Weißensee/Thüringen, Laboratorium für Dynamik und Optik, 26.10.1993

3 BAUGESCHICHTE UND ZUSTAND DES SONDIERTEN MAUERWERKES

Im 12. Jahrhundert entstand die Runneburg in Weißensee als eine der Hauptburgen der Thüringer Landgrafen zwischen der Wartburg und der Neuenburg bei Freyburg. Das heutige Erscheinungsbild der Runneburg wird durch Umbauten aus dem 16. Jahrhundert, eine teilweise Abtragung des Turmgeschosses (1750) und Veränderungen nach dem 30-jährigen Krieg und in der Mitte des 18. Jahrhunderts geprägt.



Abbildung 3.1: Südensicht der Runneburg in Weißensee (1990) [1]

Der Turm kann als Rest eines ca. 10 m höheren Wohnturmes angesehen werden. Das Mauerwerk ist zweischalig. Die Wetterschale besteht aus Travertingestein, die Raumschale aus Gipsstein sowie Tonstein [11]. Der Mörtel wurde in beiden Schalen aus Gips hergestellt.

Vermutlich aus Gründen der Tragsicherheit wurde der Turm zum Teil abgetragen (1750) und mit einem Haubendach versehen [1]. Im Turm ist ein gewölbter Raum mit römischen Ecksäulen erhalten. Der Raum darüber enthält in den Umfassungsmauern (Südseite) einen Kamin und eine Treppenanlage. Vermutlich wurden in der Umbauphase des 16. Jahrhunderts auch Veränderungen der Wand- und Fenster/Türenstrukturen vorgenommen, die zu einer veränderten Tragkonstruktion führten.

Bis 1982 kann die Ursache der Schäden auf ein Abgleiten des hangseitigen Turmes oberhalb einer Gleitschicht (ca. 10 m unter GOK) zurückgeführt werden. Während einer Umbauphase (1984-1985) erfolgte die Wiederherstellung des romanischen Charakters durch Ausmauerung der Wandnischen des 16. Jahrhunderts sowie durch die Herstellung der Geschosse auf Kellerniveau. Ferner wurden Betonfundamente zur Sicherung des Turmes eingebracht, wobei der Turmhofbereich freigelegt wurde.

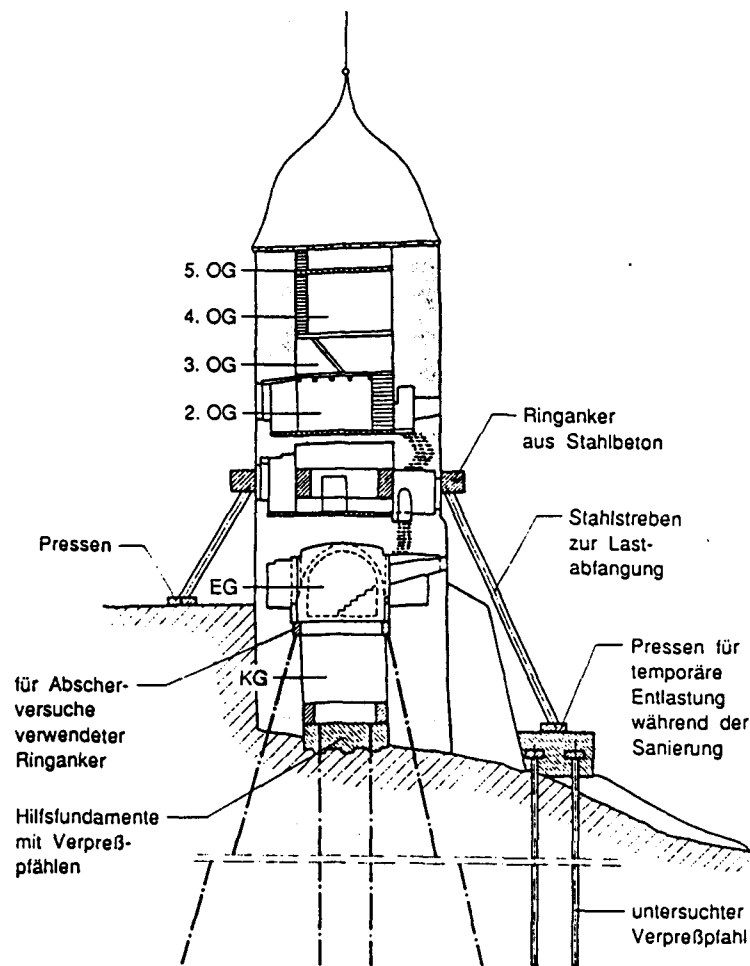


Abbildung 3.2: Stützkonstruktion am Turm der Runneburg in Weißensee [8]

Im gesamten Turmbereich erfolgten Zementinjektionen [5]. Die Mengenangaben aus den Injektionslaufkarten wurden in die Innenansichten übertragen (Anlage A). Die Injektionen erfolgten von innen, außer an der Nordseite (Keller) und der Westseite (Erdgeschoß). Die Höhenangaben der ausführenden Firma sind relativ ungenau, da sich im Burghof Auffüllungen befinden, die wahrscheinlich mit der Bezeichnung Turmfundament dem Kellergeschoß des Turmes zuzuordnen sind.

1990 wurden erhebliche Schadensfortschritte [11] beobachtet. Diese sind auf Spaltbildungen (Ausbauchung) durch Ettringittreiben im Mauerwerk und auf eine weitere Hangabwärtsbewegung zurückzuführen. Lastkonzentrationen führten weiterhin zum Versagen einzelner Mauerwerksbereiche. So mußte die Außenschale auf der Südwestseite abgetragen werden. Die Innenschale wurde mit einer Spritzbetonschale vorläufig gesichert.

Die fortschreitende Schädigung der Burg durch Ettringittreiben sowie die Bewegung der gesamten Burganlage hangabwärts machten umfangreiche Sicherungsarbeiten erforderlich. Die Arbeiten am Turm und Marstall sind abgeschlossen. In Ausführung befinden sich die Sicherungsarbeiten am Hauptgebäude. Die Turmsicherung wird schematisch in der Abbildung 3.2 dargestellt.

4 SONDIERUNGSVERFAHREN UND ERGEBNISSE

Um die Aussagekraft von Sondierungsergebnissen mittels Ultraschall und Georadar beurteilen zu können, wurden der zerstörungsfreien Sondierung nachfolgend Endoskopieuntersuchungen und Bohrkernentnahmen durchgeführt. Die Ultraschall- und Georadarmessungen wurden vom Laboratorium für Dynamik und Optik in Leonberg im Auftrag der MPA-Braunschweig veranlaßt. Die Endoskopie und die Bohrkernentnahme erfolgten durch die MPA-Braunschweig. Die Untersuchungen wurden an einem Mauerwerksbereich der Turmnordwand der Runneburg durchgeführt. Der ausgewählte Wandbereich ist durch Treibmineralbildung und Feuchteeinwirkung so stark geschädigt, daß dessen Abtrag auf der Ostseite unvermeidbar erscheint. In der Abbildung 4.1 werden die unterschiedlich sondierten Bereiche dargestellt.

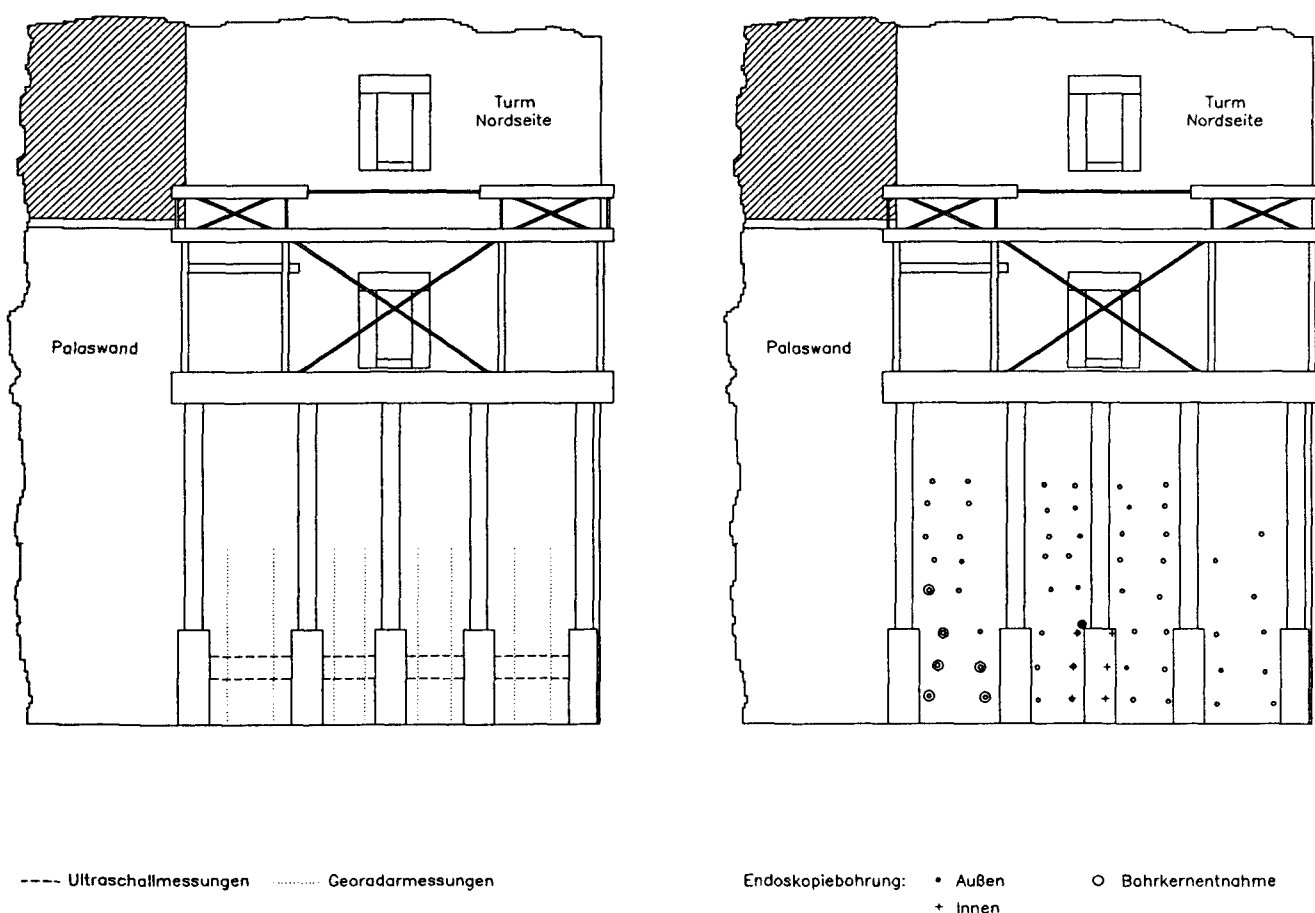


Abbildung 4.1: Sondierungsbereiche an der Nordwand



Abbildung 4.2: Ansicht der Turmnordwand

4.1 Körperschallmessungen

4.1.1 Verfahren und Einflußgrößen

Körperschallwellen sind mikromechanische Schwingungen, die sich als Sinuswellen in elastischen Medien ausbreiten. Die verwendeten Frequenzen liegen meist im Ultraschallbereich von 16 kHz bis 100 MHz.

Zur Durchführung der Messungen stehen die Transmissions- und die Reflexionsmessung zur Verfügung. Bei der Transmissionsmessung wird der Körperschallimpuls auf einer Seite des Bauteils aufgegeben und auf der gegenüberliegenden Seite mit einem

Beschleunigungsaufnehmer aufgenommen. Bei der Reflexionsmethode liegen Sender und Empfänger auf der gleichen Seite. Aufgezeichnet werden die Ausbreitungsgeschwindigkeit, die Dämpfung und die Frequenzverteilung.

Über das Geschwindigkeitsprofil kann das Gefüge des Mauerwerkes bestimmt werden. Je höher die Geschwindigkeit, um so dichter das Mauerwerk. Jedoch beeinflussen Wassergehalt und andere Anomalien die Schallgeschwindigkeit. Je geringer die Dämpfung des Schallimpulses, um so dichter das Mauerwerk [4]. Die Dämpfung des Mauerwerkes ist frequenzabhängig. Höhere Frequenzen können durch homogeneres Material gesendet werden.

4.1.2 Ergebnisse

Das Laboratorium für Dynamik und Optik in Leonberg [4] führte Transmissionsmessungen an der Turmnordwand durch. Es wurden zwei horizontale Profile durch die Nordmauer des Turmes gelegt. Die Profile befinden sich in 1,5 m (Profil 1) und 1,0 m Höhe (Profil 2).

Bestimmt wurden für jede Meßlinie und Profil die Laufzeit in unterschiedlichen Frequenzbereichen. Die Dämpfung ist nach [4] nur mit hohem Aufwand zu messen und nur schwer reproduzierbar. Aus diesem Grunde wurde in [4] auf die Auswertung der Dämpfungsmessung verzichtet.

Niedrige Geschwindigkeiten wurden bei den Meßlinien 4 und 5 sowie ab der Meßlinie 14 ermittelt. Dies deutet in diesem Bereich auf eine schlechtere Qualität des Mauerwerkes hin. Ein anderer Aufbau wird im Bereich der Meßlinien 3, 4, 8 und 10 durch die höheren Schallgeschwindigkeiten vermutet. Die Meßlinien 14 bis 18 liegen in einem Bereich, der, schon von außen gesehen, erhebliche Schäden aufweist (s. Abschnitt 3). Bei den unterschiedlichen Frequenzdurchgängen konnten ähnliche Beobachtungen gemacht werden wie bei den Schallgeschwindigkeiten.

Es werden aus der Abbildung 4.4 fünf Mauerwerksbereiche definiert. Zu beobachten ist, daß im Bereich 2 (Meßlinie 7 bis 12) hohe Geschwindigkeiten auftreten und hohe Frequenzen empfangen werden konnten. Dies deutet nach [4] auf eine andere Mauerart hin. Es könnte sich dabei um die Vermauerung einer Öffnung aus dem 16. Jahrhundert handeln (s. Abschnitt 3).

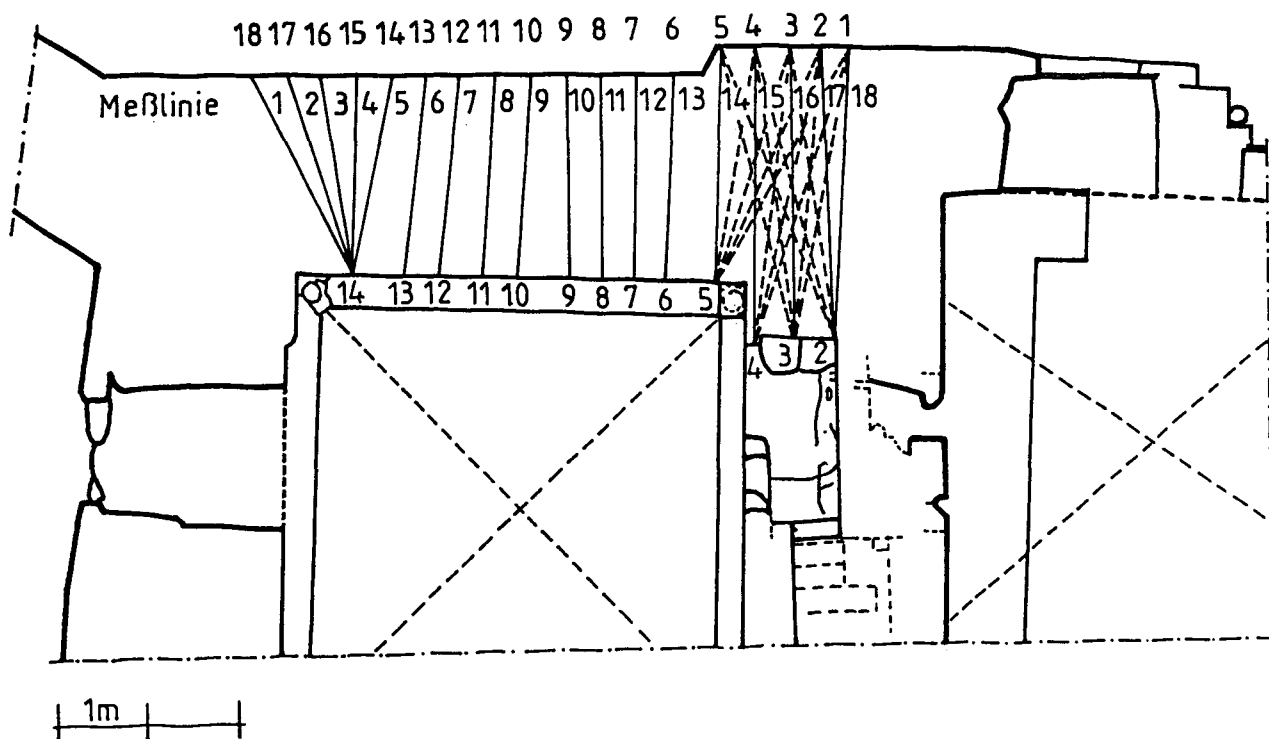


Abbildung 4.3: Schnitt durch die Nordwand (EG) mit Lage der Meßlinien [4]

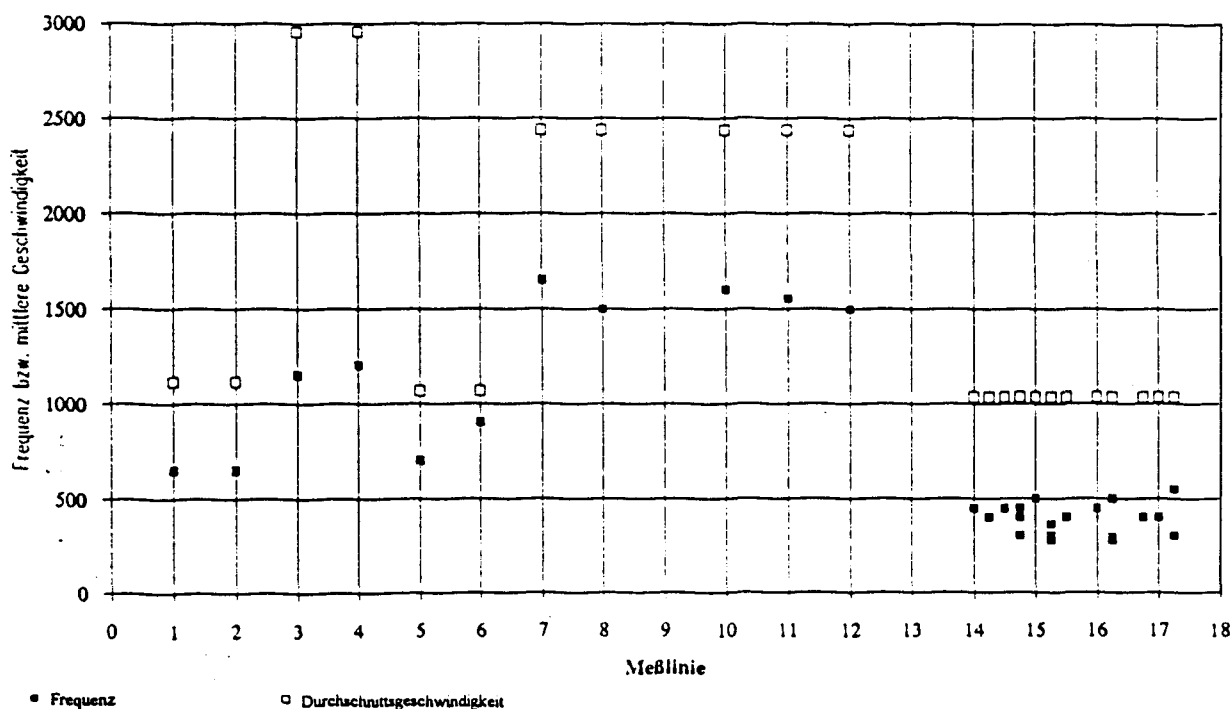


Abbildung 4.4: Mittlere Bereichsgeschwindigkeiten und Hauptfrequenzen (Profil 1) [4]

Profil 2 befindet sich 50 cm unterhalb des Profils 1. Die Messungen zeigen ähnliche Ergebnisse wie bei Profil 1.

Tabelle 4.1: Mauerwerksbereiche nach Auswertung von Profil 1 [4]

Bereich	Meßlinie	Geschwindigkeit [m/sec]	Frequenz [Hz]	Mauerwerkszustand
1	1 - 2	>100	≈ 600	schlecht
2	3 - 4	3000	1000	guter Verbund
3	5 - 6	>100	≈ 600	schlecht
4	7 - 12	2500	> 1500	hoher Verbund, einschalig
5	13 - 18	1000	< 500	schlecht

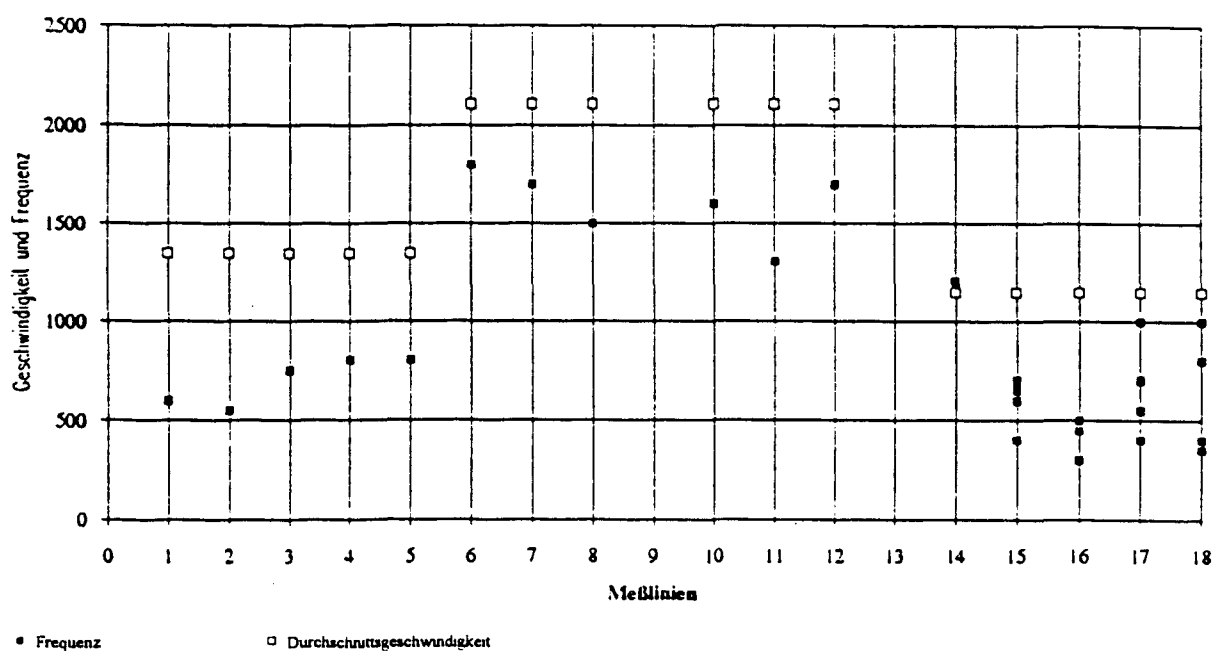


Abbildung 4.5: Mittlere Bereichsgeschwindigkeiten und Hauptfrequenzen (Profil 2) [4]

Bei der Auswertung des zweiten Profils wird eine Klassifizierung von 1 bis 4 eingeführt. Eine Beschreibung der einzelnen Klassen erfolgt nicht. Es ist jedoch davon auszugehen, daß sie mit der Tabelle 4.2 übereinstimmen.

Tabelle 4.2: Mauerwerksbereiche nach Auswertung von Profil 2 [4]

Bereich	Meßlinie	Geschwindigkeit [m/sec]	Frequenz [Hz]	Mauwerkszustand Klasse
1	1 - 5	1300	≈ 600	3
2	6 - 12	2100	≈ 1600	1
3	13 - 18	1100	≈ 600	4

Die Messungen zeigen in den zwei Meßebenen, daß der westliche Teil der Nordwand wesentlich stärker geschädigt ist als der übrige Teil. In der Mitte des Mauerwerkes wird ein sorgfältiger Verschluß einer Türöffnung vermutet, da sich hier höhere Schallgeschwindigkeiten und Frequenzen zeigen als in den übrigen Bereichen. Über weitere Anomalien werden keine Aussagen gemacht. Im allgemeinen wird von einem „schlechten“ Mauerwerk gesprochen.

4.2 Georadarmessungen

4.2.1 Verfahren und Einflußgrößen

Bei diesem Verfahren werden kurze elektromagnetische Impulse mit definierter Frequenzbreite von einem Sender über die Oberfläche in das Mauerwerk geleitet. Der Impuls dringt ins Mauerwerk und wird an Stellen mit unterschiedlichen physikalischen Kennwerten (z.B. die Dielektrizitätskonstante) in Abhängigkeit von diesen reflektiert. Anomalien (z.B. Hohlstellen, Feuchtenester, Injektionsbereiche etc.) können so über den unterschiedlichen Reflexionsgrad aufgetragen werden.

Bei der Georadarmessung werden Sender und Empfänger nebeneinander auf der Oberfläche des Mauerwerks angebracht. Die Dielektrizitätskonstante von Wasser ist abhängig vom Salzgehalt und liegt um ein vielfaches (bis Faktor 10) höher als im trockenen Naturstein. Bei Natursteinmauerwerk üben die unter Abschnitt 1 genannten Merkmale sowie die Fugenhöhe und die Verfugung einen Einfluß auf die Reflexion des Impulses aus. Der reflektierte Impuls wird mittels einer Frequenzanalyse so aufbereitet, daß markante Reflexionsfronten aufgezeigt werden können. In diesen Bereichen sind je nach Dielektrizitätskonstante Anomalien zu vermuten. Mit dem Verfahren kann das Mauerwerk -je nach Aufbau- in unterschiedliche Ebenen eingeteilt werden. Eine genaue Unter-

scheidung der Anomalien ist nach [4] noch nicht möglich, da die Theorie keine eindeutigen Abhängigkeiten zulässt.

4.2.2 Ergebnisse

Das Laboratorium für Dynamik und Optik in Leonberg [4] führte ebenfalls die Georadarmessungen an der Turmnordwand durch. Es wurden acht vertikale Profile an der Nordwand des Turmmauerwerkes aufgenommen. In der Abbildung 4.6 sind die Meßebenen dargestellt; die Abstände der Einzelmessungen je Ebene betrugen ca. 30 cm.

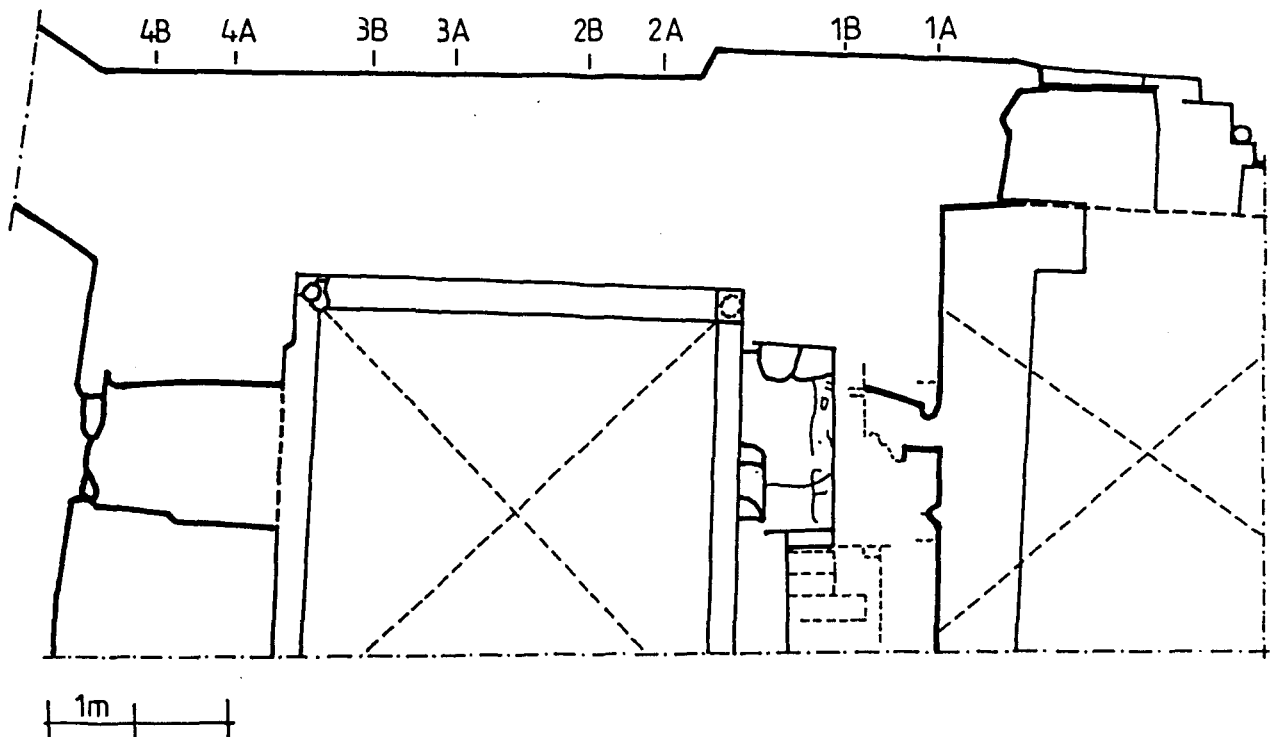


Abbildung 4.6: Profilebenen der Georadarmessungen [4]

In der Tabelle 4.3 sind die Reflexionstiefen der Georadarmessungen dargestellt. Die erste Front zeigt wahrscheinlich die äußere Schalendicke (ca. 35 cm) an. In den Profilen 1B, 4A und 4B werden im Gegensatz zu den anderen Meßprofilen höhere Impulse an den ersten beiden Reflexionsfronten aufgezeichnet. In diesen Bereichen werden größere Risse bzw. Spalte als im übrigen Mauerwerk vermutet [4].

Tabelle 4.3: Durchschnittliche Reflexionstiefen in cm [4]

Meßebene	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	\bar{t}^*
1. Front	30	37	32	31	31	33	42	44	35
2. Front	58	73	62	57	60	58	79	80	66
3. Front	98	118	106	85	101	100	108	117	104
4. Front	121	146	132	113	135	147	133	146	134
5. Front					160		155		155

* Mittelwert aus allen Ebenen (1A - 4B)

Außer der Definition der äußeren Schale können aus der Georadarmessung kaum Erkenntnisse entnommen werden. Weiterhin werden zwar Risse bzw. Schalenabplatzungen vermutet, die jedoch nicht identifiziert werden können. Über weitere Anomalien werden keine Aussagen getroffen. Wie der Autor schreibt, sind in Zukunft genauere Aussagen zu erwarten. Ohne genauere Aussagen zu den unterschiedlichen Merkmalen erscheint der finanzielle Aufwand zu hoch.

4.3 Bohrlochendoskopie

4.3.1 Verfahren und Einflußgrößen

Mit einem starren dünnen Stahlrohr, in dem ein Kaltlichtendoskop eingebettet ist, erfolgen die Endoskopieaufnahmen in Bohrungen von ca. Ø 22 mm. Die Bohrlochwandungen werden über eine Kamera aufgezeichnet und auf einem Bildschirm dargestellt. Einzelne Bereiche können mit einer Spiegelreflexkamera fotografiert werden.

Bei diesem Verfahren können Aufnahmen in Bohrlochrichtung und normal zur Bohrlochachse aufgezeichnet werden. Die Dokumentation der Befunde erfolgt auf Videokassetten, wobei die jeweiligen Positionen des Endoskops (Blickrichtung, Bohrtiefe u.a.m.) über Mikrophon festgehalten werden. Jedes Bohrloch wird i.d.R. dreimal durchfahren. Die Bohrungen werden im Fugenkreuz des Natursteinmauerwerkes gesetzt, um das Mauerwerk möglichst zerstörungsfrei zu untersuchen.

Bei der Bewertung der Videoaufnahmen ist zu beachten, daß infolge ähnlicher Farbtönungen von Stein, Mörtel und Injektionen die Unterscheidung der Materialien teilweise schwierig ist. Ferner werden beim Bohrvorgang nicht festhaftende, vertikale Mörtelpartien teilweise gelöst. Die Endoskopie vermittelt daher einen verfälschten Eindruck des ungestörten Mauerwerks. Die Beurteilung der Klüftigkeit wird durch die starke Vergrößerung des Endoskopieobjektivs teilweise erschwert.

4.3.2 Ergebnisse

Endoskopieuntersuchungen wurden im März/April 1994 an der Turmnordwand durchgeführt. Die für die Endoskopieaufnahmen erforderlichen Bohrungen führte die Firma Preßbau GmbH, Oberhausen, durch. Gebohrt wurde mit einem Spiralbohrer. Das beim Bohren anfallende Bohrmehl wurde abschnittsweise (i.d.R. 20 cm) aufgefangen und in Behältern luftdicht aufbewahrt. An einigen Bohrmehlproben wurden exemplarisch Baustoffuntersuchungen vorgenommen.

Die Bohrstellen wurden von einem Mitarbeiter der MPA-Braunschweig festgelegt, wobei ausschließlich Fugenbereiche ausgewählt wurden, um die Beschädigung des Natursteinmauerwerkes zu minimieren. Es wurden 57 Bohrungen von außen ins Mauerwerk durchgeführt. Von innen sind sechs Bohrlochendoskopien angelegt. Wegen der Stahlkonstruktionen im Innen- und Außenbereich war es nicht möglich, den gesamten Bereich gleichmäßig zu untersuchen.

In der Abbildung 4.7 sind die Lagen der Bohrlochendoskopien dargestellt. Eine kurze Beschreibung der Aufnahmen sowie die Darstellung des Gefüges im durchfahrenen Mauerwerk erfolgt in der Anlage B. Die verschiedenen Blickrichtungen wurden zusammenfassend dargestellt.

Bei der Auswertung der Endoskopieaufnahmen werden unterschiedliche Hohlräume beschrieben. Hohlräume, die in den Außenschalen dargestellt sind, kennzeichnen fehlende Lagerfugen bzw. Verfugungen. Im Übergangsbereich von Außen- und Innenschale dargestellte Hohlräume zeigen Spalten zwischen den beiden Schalen an. In der Innenschale dargestellte Hohlräume weisen auf Auswaschungen oder bei der Herstellung entstandene Fehlstellen hin.

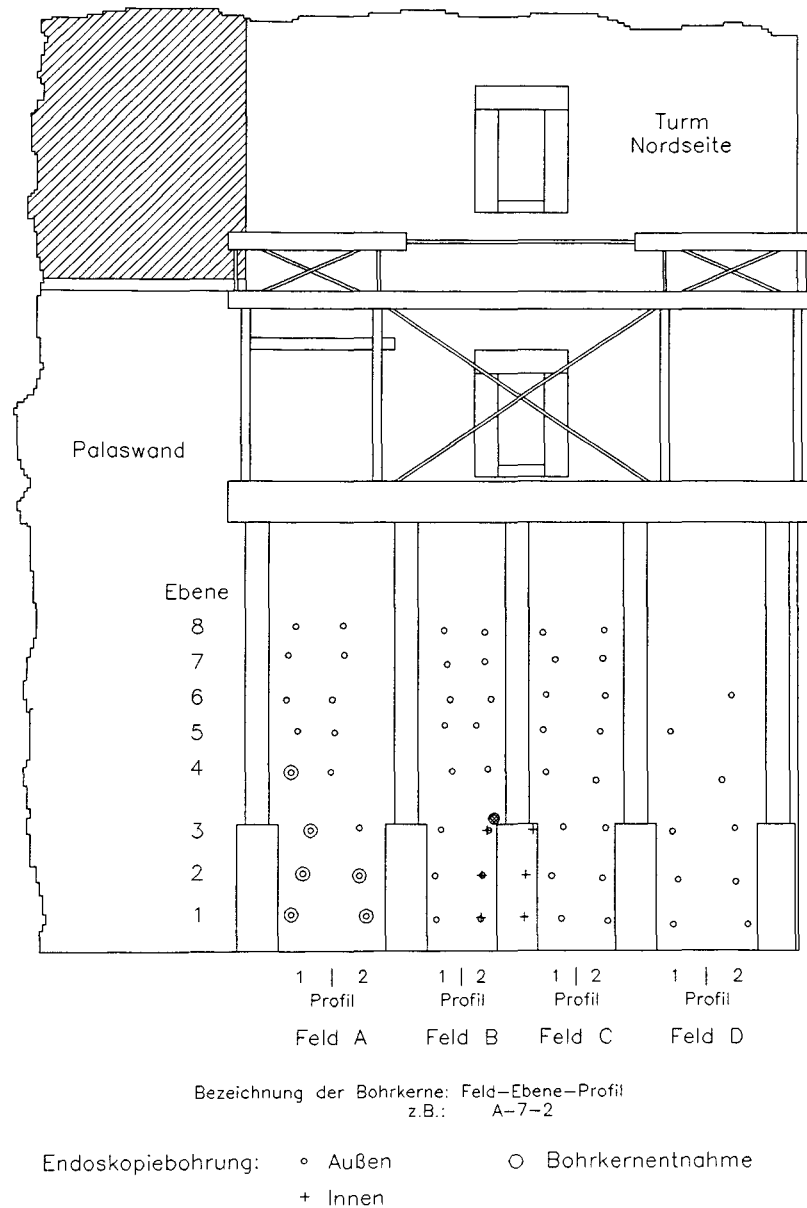


Abbildung 4.7: Lage der Bohrlochendoskopien und der Bohrkerne in der Nordwand

In der Darstellung Anlage B wird zwischen Hohlraum, kompaktem Mauerwerk, lockerem Mörtel, Mörtel, Zementinjektionen und Ziegel unterschieden. Kompaktes Mauerwerk wird dann dargestellt, wenn eine Unterscheidung der Materialien nicht möglich ist. Die Zementinjektion/Mörteldarstellung zeigt einen mit Zementinjektion durchdrungenen Mörtel.

- Feld A (Außenseite)

Die Außenschale der Nordwand weist eine Dicke von ca. 35 cm auf. Einige Lagerfugen sind in den vorderen Bereichen ausgebrochen. Hohlräume sind in den Ebenen 2-6 in der

Innenschale zu erkennen. Zementinjektionen zeigen sich besonders oberhalb der ersten Ebene im gesamten Bereich der Innenschale.

- **Feld B (Außenseite)**

Auch hier kann eine Außenschalendicke von ca. 35 cm vermutet werden. Einige Lagerfugen sind ebenso ausgebrochen. Zementinjektionen konnten in den Ebenen 1-5 beobachtet werden. Der Hohlraumanteil in der Innenschale ist geringer als im Feld A.

- **Feld C (Außenseite)**

Die Außenschalendicke wird auch hier mit 35 cm angenommen, jedoch ist diese Linie nicht so eindeutig zu bestimmen wie in den Feldern A und B. Zementinjektionen konnten auf ganzer Tiefe (außer 75-90 cm) im Bohrloch C-1-2 erkannt werden. Hier ist das Injektionsgut bis in die Lagerfugen bzw. in die Verfugung vorgedrungen. Der Hohlraumgehalt der Innenschale ist wesentlich geringer als in den o.g. Feldern.

- **Feld D (Außenseite)**

Hier kann die gleiche Außenschalendicke angenommen werden wie in den übrigen Feldern. Zementinjektionen sind nur in den Ebenen 1 und 2 vorhanden. Der Hohlraumgehalt ist in der Innenschale nur oberhalb der Ebene 2 zu beobachten.

- **Feld I (Innenseite)**

Die Schalendicke auf der Innenseite beträgt ca. 35 cm. In den unteren Ebenen konnte Zementinjektion festgestellt werden. Der Hohlraumgehalt der Innenschale ist bis zu einer Tiefe von 120 cm gering.

Die Turmnordwand der Runneburg zeigt Außenschalendicken von ca. 35 cm. Die Innenschale (ca. 200 cm) ist unterschiedlich. In den Feldern A und B ist die Schale mit Zementinjektionen durchsetzt und der Hohlraumgehalt ist hoch. In den Feldern C und D sind noch geringe Mengen von Zementinjektionen vorhanden, außer bei den Bohrungen C-1-2 und D-2-1. Der Hohlraumgehalt in den Feldern C und D ist geringer als in den Feldern A und B.

4.3.2.1 Baustoffuntersuchungen

Exemplarisch wurden an 27 Bohrmehlproben die Materialfeuchte (bei 40°C) und der Gipsgehalt chemisch bestimmt. Phasenanalysen wurden an weiteren Bohrmehlproben durchgeführt.

Die Materialfeuchte (Abbildung 4.8) liegt im Bereich von 1 - 20 M.-% ($\bar{u} = 8,6$ M.-%). Eine Abhängigkeit der Feuchte von der Bohrtiefe konnte nicht ermittelt werden. Die Werte unterhalb von 3 M.-% können auf Meßungenauigkeiten hindeuten. Auch kann beim Bohrvorgang Wasser verdunstet sein, obwohl eine niedrige Vortriebsgeschwindigkeit beim Bohren die Verdunstung gering halten sollte.

Mit Hilfe der Röntgenfeinstrukturanalyse wurden die Phasenbestandteile der Bohrmehl- und Bohrkernproben (s. Abschnitt 4.4) bestimmt. Bei dieser Untersuchungsmethode werden über Beugungserscheinungen von Röntgenstrahlen am Kristallgitter die Abstände der Atomlagen in der kristallinen Phase ermittelt. Durch Vergleiche der so erhaltenen Röntgendaten lassen sich kristalline Verbindungen identifizieren.

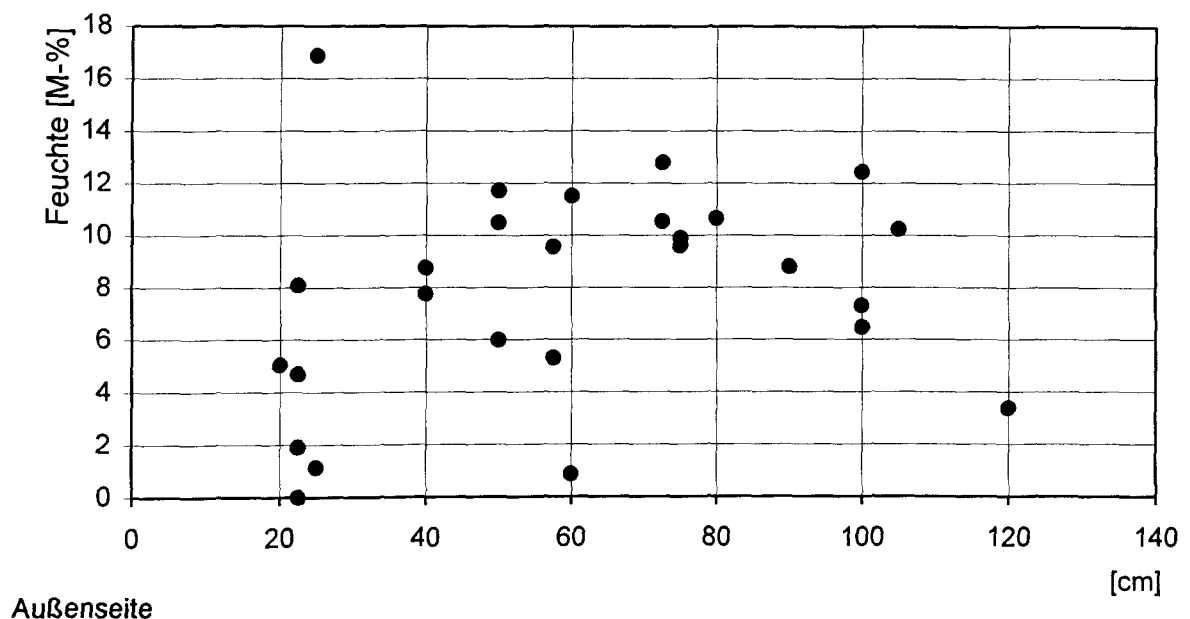


Abbildung 4.8: Materialfeuchte der Bohrmehlproben

Zu Beginn wurden alle Proben (Anlage B) röntgenografisch auf das Vorhandensein von Gips beim Beugungswinkel $2\theta = 11,65^\circ$ untersucht.

An vier Bohrmehlproben wurden vollständige Röntgenfeinstrukturanalysen durchgeführt. Bei der Probe 1 (A-7-2, 0-45 cm) handelt es sich vorwiegend um Calcit und Gips. Dies könnte ein Gipsmörtel mit Kalksteinzuschlag sein. Die Probe 2 (A-7-2, 50-80 cm) weist sehr viel Gips auf. Es handelt sich um reinen Gipsmörtel, wobei auch Ettringit nachgewiesen werden konnte. Dies deutet auf Kontakt mit Zementmörtelinjektion in unmittel-

barer Nähe hin. Die Proben 3 und 4 (A-5-1, 65-80 / 80-130 cm) zeigen gleiche Strukturen wie die Probe 2.

Naßchemisch wurde der Sulfatgehalt durch Ausfällung als Bariumsulfat, BaSO_4 , ermittelt. Durch Umrechnung mit dem Faktor 2,15 wurde der Gehalt an hydratisiertem Gips, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, errechnet.

Mit den Baustoffuntersuchungen konnten unterschiedliche Materialien nachgewiesen werden. Die Röntgenfeinstrukturanalysen zeigten Gipsmörtel, Calcit, Ettringit und Kalkstein. Die hohe Feuchtigkeit der Proben könnte auf hohen Wassereintrag über längere Zeit hindeuten. Eine genaue Lokalisation unterschiedlicher Feuchtigkeitsbereiche konnte nicht erreicht werden.

Die Analysen der Bohrmehlproben geben ein ungenaues Bild der Untersuchungen wieder, da durch den Bohrvorgang Materialien aus anderen Bereichen mit aufgefangen werden.

4.4 Bohrkernentnahme

4.4.1 Verfahren und Einflußgrößen

Bei der Entnahme von Bohrkernen werden mit Hohlbohrern, die mit Diamantkronen bestückt sind, Zylinder aus dem Mauerwerk herausgebohrt. Eine Wasserumspülung sorgt für die Kühlung der Bohrkronen. Während des Bohrvorgangs wird das Bohrgerät fest auf das Mauerwerk gedübelt. Die Bohrkernabschnitte werden abschnittsweise aus dem Mauerwerk herausgetrennt und in einem Holzkasten aufbewahrt. Anschließend wird der Bohrkern dokumentiert (Anlage C). Können aus dem Mauerwerk zusammenhängende Bohrkernabschnitte entnommen werden, so wird an diesen Kernen eine Druckprüfung zur Tragfähigkeitsbeurteilung vorgenommen. Jedoch ist bei historischem Mauerwerk häufig ein zusammenhängender Bohrkern nicht zu gewinnen. Deshalb beschränken sich die Untersuchungen auf Baustoffunterschiede und -kennwerte sowie auf die Beurteilung des Mauerwerksaufbaus.

4.4.2 Ergebnisse

In den unter [3] aufgeführten Untersuchungen wurden bereits Kernbohrungen an der Runneburg ausgewertet. In der Anlage C sind die Bohrkernquerschnitte dargestellt. Die

Kernbohrungen wurden von innen nach außen durch den Mauerwerksquerschnitt geführt. Aus den Bohrkernlängen ist zu erkennen, daß sich die Nordwanddicke -vom Keller zum Dachgeschoß gesehen- von 2,70 m auf 2,00 m verengt. Die Bohrkernquerschnitte zeigen zwei Außenschalen und eine Innenschale. In der Innenschale ist ein hoher Mörtelanteil vorhanden, der mit Zementstein (Betonstruktur) und Naturstein versetzt ist.

Die Kernbohrungen (\varnothing 15 cm) von der MPA-Braunschweig erfolgten bis zu einer Tiefe von 1,40 m. Es wurden sechs Endoskopielöcher überbohrt. So bestand die Möglichkeit die Endoskopieauswertung mit denen der Bohrkernprofile zu vergleichen. Weiterhin sollten mechanische und mineralogische Eigenschaften an den Bohrkernen ermittelt werden. Der schlechte Zustand der Innenschale verhinderte die Entnahme eines zusammenhängenden Kerns, womit eine Ermittlung der mechanischen Kennwerte nicht möglich war. Die Bohrkernquerschnitte sind in der Anlage C dargestellt. Eine Unterscheidung der Materialien erfolgt in Kalkstein, Travertin, Zement, Mörtel, grobkörniger Mörtel, Schiefer und lockeres Gefüge.



Abbildung 4.9: Teilansicht der Turmnordwand mit Lage der Bohrkern

Die Bilder der Anlage C geben ein verzerrtes Mauerwerksprofil wieder. Der schlechte Zustand der Innenschale, durch Hohlräume und lockeren Mörtel, läßt die Entnahme eines zusammenhängenden Bohrkerns nicht zu. Die Zuordnung der „Bohrkernstücke“ ist

dadurch schwierig. Eine Endoskopieaufnahme der Bohrkern erfolgte nicht, da der große Bohrkernquerschnitt nicht ausgeleuchtet werden konnte.

4.4.2.1 Baustoffuntersuchungen

Mit Hilfe der Röntgenfeinstrukturanalyse wurden Phasenbestandteile der Bohrkernproben bestimmt. Aus den Bohrkernen wurden exemplarisch zehn Proben entnommen. Die Proben wiesen augenscheinlich unterschiedliche Merkmale auf. Die dunklen Bereiche im Bohrkern ließen den Schluß zu, daß es sich um Zementstein aus den Injektionen handelt. Hier wurde auf eine genauere Untersuchung verzichtet.

Die vollständigen Beugungsdiagramme der Röntgenfeinstrukturanalysen sind in der Anlage C dargestellt. Gipsmörtel wurde in den Proben A-1-2/1, A-2-2/1 und A-3-1/1 nachgewiesen. Die Röntgenfeinstrukturanalyse ergab weiterhin Kalkstein mit anhaftenden Gipsmörtel in den Proben A-4-1/1 und A-4-1/2. In den Proben A-1-1/1 und A-2-2/2 befanden sich Kalkstein oder Travertin. Einen Gipston mit einem weich zerfallenden Mauerstein wurde in den Proben A-1-1/2, A-1-2/2 und A-2-1/1 vorgefunden. Es kann sich hierbei auch um Gipsbänder in einem Ton handeln.

4.5 Vergleich der Sondierungsverfahren

Die physikalischen Verfahren beruhen auf den unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der untersuchten Bereiche. Für die Untersuchungen sind möglichst gleiche mechanische Eigenschaften der Außen- und Innenschalen wünschenswert. So können Anomalien im Natursteinmauerwerk deutlich erfaßt und dokumentiert werden.

Köperschalluntersuchungen wurden in zwei Ebenen an der Nordwand durchgeführt. Aus den Untersuchungen konnten unterschiedliche Bereiche an der Nordwand definiert werden. Im Bereich einer Ausmauerung (Türöffnung) konnten höhere Schallgeschwindigkeiten ermittelt werden. Die zwei Meßebenen erscheinen zur Beurteilung der Wand zu gering. Um detaillierte Erkenntnisse über das Mauerwerk zu erhalten, sind sicherlich mehr Meßebenen erforderlich.

Mit den Georadarmessungen können unterschiedliche Schicht- bzw. Schalenkanten ermittelt werden. An der Nordwand wurden unterschiedliche Schichtkanten dokumentiert, jedoch nicht genauer beschrieben.

Durch die Endoskopieaufnahmen konnten weitgehende Aussagen zur Nordwand gemacht werden. Es wurde ein dreischaliges Natursteinmauerwerk nachgewiesen. Hohlräume, Zementinjektionen, Spalten und Mörtelbereiche konnten lokalisiert werden. An den Bohrmehlproben wurden Gips, Ettringit und Kalkstein nachgewiesen. Aussagen über die Bohrmehlfeuchte konnten getroffen werden.

Im östlichen Teil der Wand wurden Bohrkern entnommen. Der marode Zustand der Bohrkern zeigt, in welchem Zustand das Mauerwerk in diesem Bereich ist. Das Mauerwerksprofil läßt sich so nur schwer aufzeichnen. Hohlräume können nicht genau zugeordnet werden. Durch die Entnahme der Bohrkern konnten die Aussagen der Endoskopieaufnahmen weitestgehend verifiziert werden.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Am Turmmauerwerk der Runneburg wurden unterschiedliche Sondierungsverfahren angewandt. Das Mauerwerk befindet sich im maroden Zustand. Teile dieses Mauerwerkes müssen in Kürze ersetzt werden. Der Naturstein, ein Travertinstein aus der Umgebung, zeigt sehr unterschiedliche mechanische Eigenschaften.

Die Ergebnisse der Sondierverfahren zeigen ein Mauerwerk aus drei Schalen. Hohlräume, Zementinjektionen sowie Gipsmörtel konnten dokumentiert werden. An Bohrmehlproben (Endoskopieverfahren) und Bohrkernen wurden Gips, Ettringit und Travertin nachgewiesen.

Die physikalischen Verfahren konnten Spalten, Mehrschaligkeit, Feuchtigkeitsbereiche und Hohlräume nur begrenzt aufzeigen. Hierbei ist zu beachten, daß das hier untersuchte Mauerwerk unterschiedliche Gefügemerkmale und zahlreiche Anomalien aufweist, die schwer zu identifizieren sind.

Bei der Anwendung unterschiedlicher Sondierverfahren sind bei unterschiedlichen Problemen klare Fragestellungen und Untersuchungskonzepte erforderlich. Hieraus lassen sich die jeweilig erforderlichen Sondierungsmethoden ableiten.

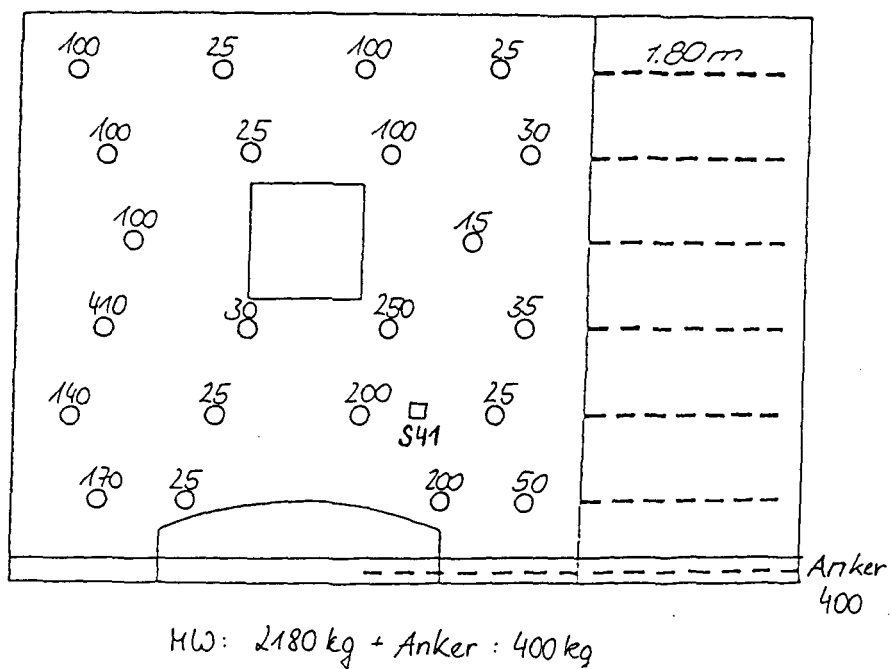


Abbildung A1: Injektionen in der Nordwand (DG) [5]

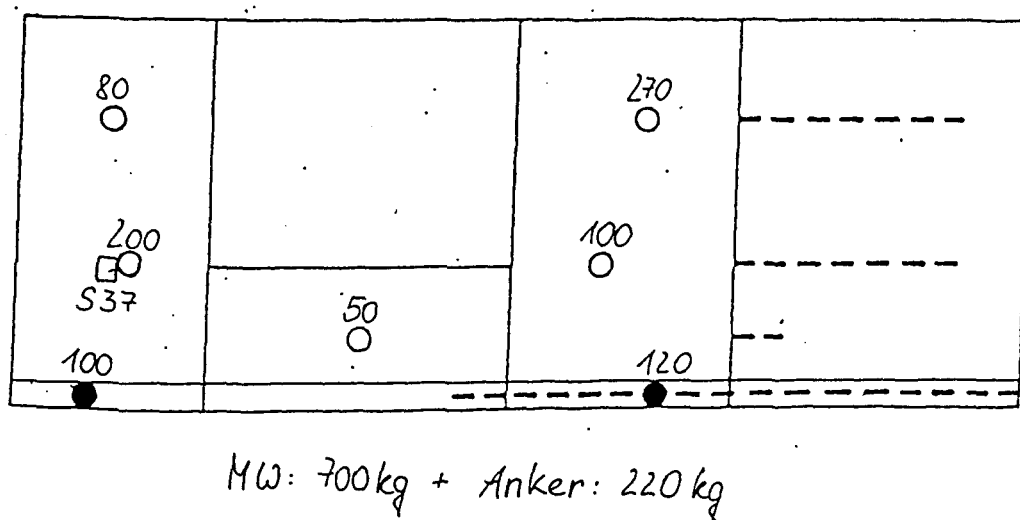
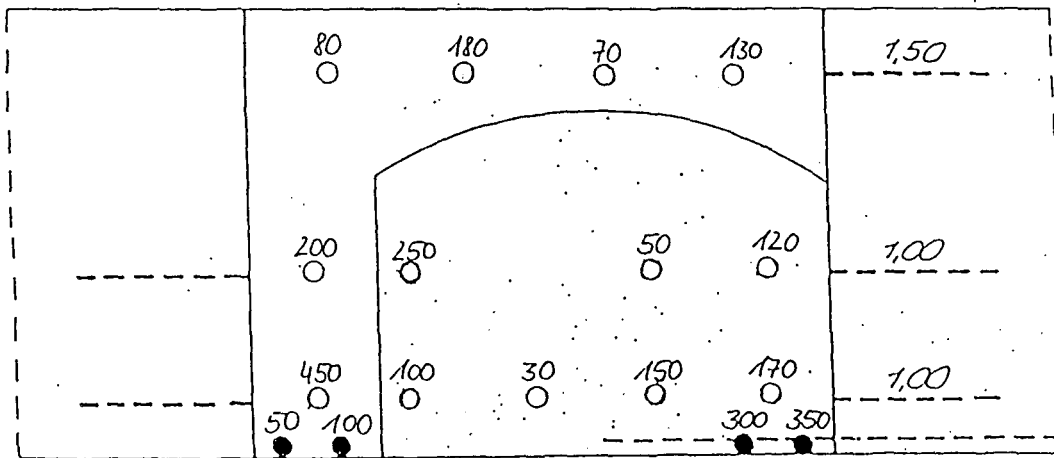
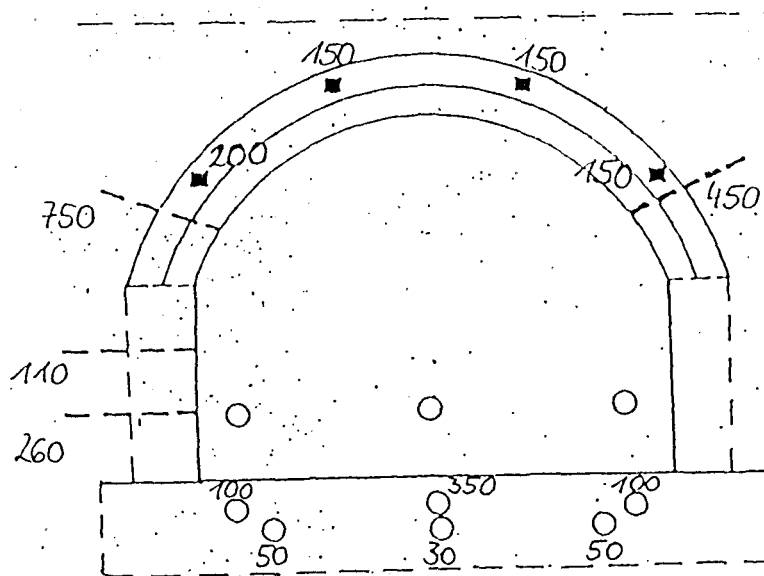


Abbildung A2: Injektionen in der Nordwand (2.OG) [5]



MW: 1980 kg + Anker 800 kg

Abbildung A3: Injektionen in der Nordwand (1.OG) [5]



MW: 2250 kg
+ Anker: 650 kg

Abbildung A4: Injektionen in der Nordwand (EG) [5]

Tabelle A1: Zementinjektionen im Turm in kg [5]

	Nord	West	Süd	Ost	Anker	Gesamt
DG	2180	2875	2305	1700	800	9860
2.OG	700	958	1000	1520	950	5128
1.OG	1980	1960	1340	3613	2260	11153
EG	2250	16401	7605	1530	2550	30336
KG						12647
Summe	7110	22194	12250	8363	6560	69124

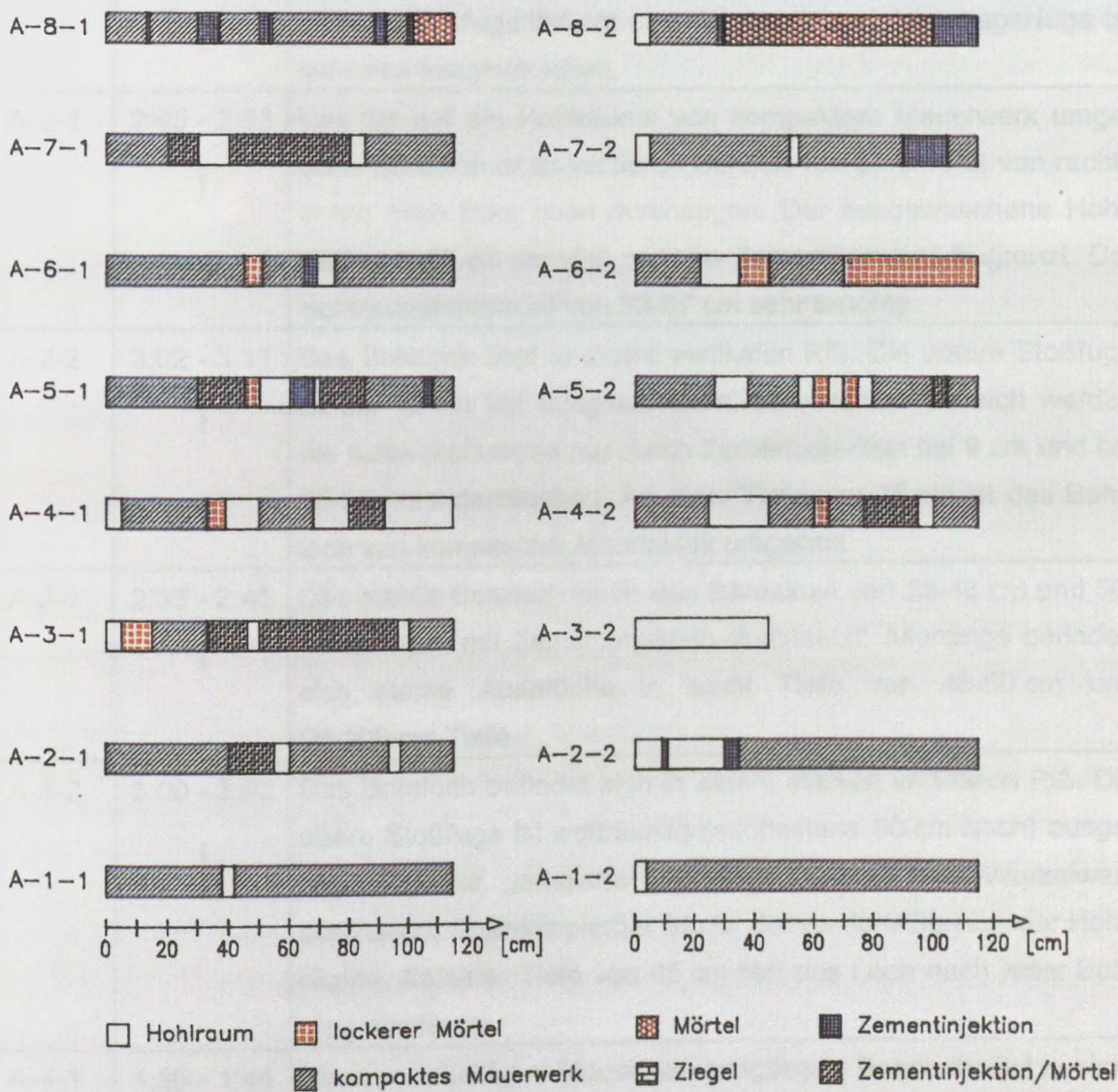


Abbildung B1: Darstellung der Endoskopieprofile im Feld A

Tabelle B1: Beschreibung der Endoskopieaufnahmen im Feld A

Bohrloch	Videozeit	Bohrlochbeschreibung
A-1-1	2:55 - 3:00 	Die Stoßfuge über dem von kompaktem Mauerwerk umgebenen Bohrloch ist ca. 2 cm tief ausgebrochen. Eine brüchige Stelle befindet sich im Bereich von 38-42 cm. Danach schließt sich bis 70 cm ein Bereich an, der gering mit Zementinjektion durchsetzt ist.
A-1-2	3:11 - 3:21 	Das von kompaktem Mauerwerk umgebene Bohrloch ist an der oberen Stoßfuge 3-4 cm und die rechte und linke Lagerfuge ist teilweise ausgewaschen.
A-2-1	2:45 - 2:53 	Das bis auf die Hohlräume von kompaktem Mauerwerk umgebene Bohrloch ist im vorderen Bereich von einem Riß von rechts unten nach links oben durchzogen. Der ausgewaschene Hohlraum bei 55-60 cm wird nur von Zementinjektion begrenzt. Der Hohlraumbereich ist von 93-97 cm sehr brüchig.
A-2-2	3:02 - 3:11 	Das Bohrloch liegt in einem vertikalen Riß. Die untere Stoßfuge ist ca. 10 cm tief ausgewaschen. Im vorderen Bereich werden die Auswaschungen nur durch Zementinjektion bei 9 cm und bei 30-35 cm unterbrochen. Ab einer Tiefe von 35 cm ist das Bohrloch von kompaktem Mauerwerk umgeben.
A-3-1	2:33 - 2:45 	Das stabile Bohrloch ist in den Bereichen von 33-46 cm und 50-96 cm stark mit Zementinjektion durchsetzt. Allerdings befinden sich starke Ausbrüche in einer Tiefe von 46-50 cm und 96-100 cm Tiefe.
A-3-2	3:00 - 3:02 	Das Bohrloch befindet sich in einem starken vertikalen Riß. Die obere Stoßfuge ist weiträumig (mindestens 50 cm hoch) ausgewaschen. Die gerissene Lagerfuge links ist von Wurzelwerk durchsetzt. Endoskopierbar ist nur der vordere Bereich der Hohlräume. Ab einer Tiefe von 45 cm fällt das Loch nach jeder Bohrung wieder zu.
A-4-1	1:36 - 1:44 	Das von brüchigem Mauerwerk umgebene Bohrloch sitzt in einer Stoßfuge, welche bis zu einer Tiefe von 48 cm ausgewaschen ist. Ab 80 cm werden die Hohlräume nur noch von vereinzelten Adern der Zementinjektion unterbrochen.

Tabelle B1: Beschreibung der Endoskopieaufnahmen im Feld A (Fortsetzung)

Bohrloch	Videozeit	Bohrlochbeschreibung
A-4-2	2:14 - 2:33 	Die rechte Lagerfuge ist im vorderen Bereich ausgewaschen. Die darunterliegende Stoßfuge ist gerissen. Der Bereich von 77-95 cm ist stark mit Zementinjektion durchsetzt.
A-5-1	1:25 - 1:36 	Relativ kompaktes Mauerwerk bis auf größere, poröse Ausbrüche im Bereich von 50-60 cm. Injektionsmörtel ist im Bereich von 30-85 cm in Form von feingliedrigen Adern zu erkennen.
A-5-2	1:59 - 2:14 	Im vorderen Bereich sehr kompakt, dafür aber im mittleren Bereich lockerer und brüchiger. Die vorgefundenen Hohlräume sind relativ groß.
A-6-1	1:03 - 1:14 	Kleinere Hohlräume im Bereich 69-75 cm. Im Bereich von 65-69 cm befindet sich Injektionsmörtel. Mit den oben genannten Ausnahmen handelt es sich um ein kompaktes Mauerwerk.
A-6-2	1:44 - 1:59 	Neben dem von brüchigem Mauerwerk umgebenem Bohrloch ist das Mauerwerk bis zu 15 cm tief ausgewaschen. In den Bereichen von 22-35 cm und 70-115 cm sind starke Auswaschungen zu erkennen. Ab 70 cm sind die Hohlräume nur noch mit brüchigem Mörtel durchsetzt, die teilweise Zementinjektionen enthalten.
A-7-1	1:03 - 1:14 	Injektionsmörtel ist im Bereichen 40-80 cm zu erkennen. Hier ist der Injektionsmörtel deutlich im Mörtel eingepreßt. Es erfolgt in der grafischen Darstellung eine Zementinjektion/Mörtelkombination. Weiterhin erkennt man Hohlräume in den Bereichen 30-40 cm und 80-85 cm.
A-7-2	0:43 - 1:00 	Die Lagerfuge ist vorne leicht ausgebrochen. Es befindet sich ein Hohlraum im Bereich von 45-52 cm. Ein lockerer Mörtel wurde im Bereich von 52-60 cm vorgefunden. Injektionsmörtel ist im Bereich von 60-92 cm vorhanden.
A-8-1	0:00 - 0:19 	Das Bohrloch ist vorne leicht ausgebrochen. In den Zwischenbereichen ist Zementinjektion zu erkennen; ansonsten sind nur geringe Hohlräume vorhanden.
A-8-2	0:19 - 0:37 	Das Bohrloch ist vorne leicht ausgebrochen. In den Bereichen von 28-30 cm und 100-115 cm befinden sich Zementinjektionen.

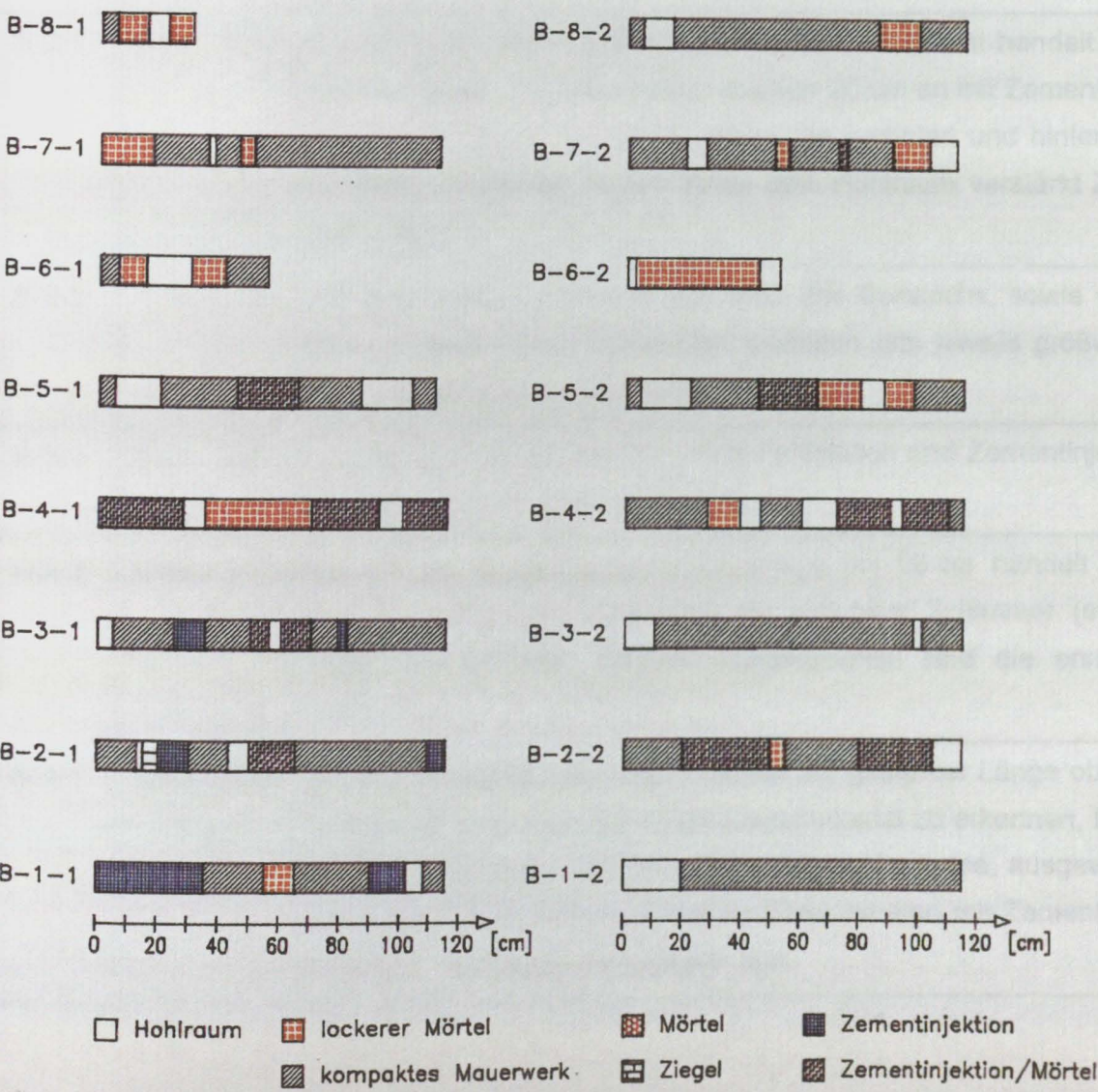


Abbildung B2: Darstellung der Endoskopieprofile im Feld B

Tabelle B2: Beschreibung der Endoskopieaufnahmen im Feld B

Bohrloch	Videozeit	Bohrlochbeschreibung
B-1-1	0:32 - 0:45 I	Zementinjektionen sind bis zu einer Tiefe von 55 cm und im Bereich von 90-105 cm zu erkennen. Das Mauerwerk ist in den übrigen Bereichen lockerer.
B-1-2	1:21 - 1:33 I	Das ausgewaschene Fugenkreuz (0-9 cm) ist mit Wurzelwerk durchsetzt. Ab einer Tiefe von 20 cm sind keine Fehlstellen mehr zu erkennen, jedoch macht das Mauerwerk einen lockeren Eindruck.
B-2-1	0:16 - 0:32 I	Bis auf einen relativ großen Ausbruch bei 43-50 cm handelt es sich um kompaktes Mauerwerk, das von 20 cm an mit Zementinjektion durchzogen ist. Dabei zeigen die vorderen und hinteren Bereiche, sowie der Bereich hinter dem Hohlraum verstärkt Zementinjektion.
B-2-2	1:14 - 1:21 I	Vor dem großen Hohlraum am Ende des Bohrlochs, sowie vor dem lockeren Bereich bei 53 cm, befinden sich jeweils größere mit Zementinjektion durchsetzte Abschnitte.
B-3-1	0:45 - 0:54 II	Homogenes Mauerwerk mit wenig Fehlstellen und Zementinjektion im gesamten mittleren Bereich.
B-3-2	0:54 - 1:14 II	Bis auf die ausgewaschene Trennfuge bei 98 cm handelt es sich um kompaktes Mauerwerk mit rötlichem Schimmer (evtl. Ziegel) im vorderen Bereich. Ausgebrochen sind die ersten 10 cm.
B-4-1	3:23 - 3:34 II	Der lockere Bereich von 28-70 cm hat auf gesamter Länge oben Ausbrüche, und es ist bei 40 cm Ziegelmateriale zu erkennen. Bei 92-100 cm befindet sich eine breite, rundumlaufende, ausgewaschene Fuge. Sämtliche restlichen Bereiche sind mit Zementinjektionen durchsetzt und dadurch fest.

Tabelle B2: Beschreibung der Endoskopieaufnahmen im Feld B (Fortsetzung)

Bohrloch	Videozeit	Bohrlochbeschreibung
B-4-2	3:48 - 3:58 II	Insgesamt erscheint das Gefüge relativ locker mit vielen Fehlstellen, besonders in den Bereichen von 28-46 cm und 60-70 cm. Das Fugenmaterial hat einen rötlichen Schimmer, was auf Ziegelmaterial schließen läßt. In der Umgebung der rundumlaufenden, ausgewaschenen Fuge bei 90-94 cm ist Zementinjektionsmaterial sichtbar.
B-5-1	3:15 - 3:23 II	Die Stoßfuge über dem Bohrloch ist hinter dem Verfugmörtel 20 cm tief ausgebrochen. Danach folgt ein lockerer aber homogener Bereich, welcher ab 45 cm durch Zementinjektionsmaterial stabiler wird. Ab 86 cm Tiefe wird das Bohrloch sehr locker mit großen Ausbrüchen, so daß es ab 111 cm zufällt.
B-5-2	3:39 - 3:48 II	Das insgesamt sehr lockere Gefüge mit vielen Ausbrüchen ist bei 115 cm zusammengefallen. Der einzige kompakte Bereich von 45-65 cm ist ab 45 cm mit Zementinjektion durchsetzt.
B-6-1	3:10 - 3:15 II	Das lockere Gefüge mit großen Hohlräumen ist bei 55 cm zusammengefallen.
B-6-2	3:34 - 3:39 II	Die Lagerfuge rechts und links vom Bohrloch ist ca. 5 cm tief ausgewaschen. Der restliche mit Ziegelmaterial durchsetzte Bereich ist so locker, daß bei 45 cm große Ausbrüche beginnen und das Bohrloch ab 52 cm zugefallen ist.
B-7-1	0:27 - 0:34 III	Im vorderen Bereich, sowie zwischen 35-37 cm und 45-50 cm, erscheint das Gefüge locker. Ansonsten handelt es sich um kompaktes Gefüge, das im hinteren Bereich dunkler erscheint. Dabei ist nicht ersichtlich, ob es sich um Naturstein oder Zementinjektion handelt. Die Bohrung ist bei 112 cm zugefallen.
B-7-2	0:34 - 0:46 III	Das insgesamt kompakte Mauerwerk ist mit kleinen lockeren Bereichen durchsetzt. Ab 90 cm wird das Gefüge lockerer. Durch große Ausbrüche fällt das Bohrloch bei 112 cm wieder zu.
B-8-1	0:18 - 0:19 III	Die Bohrung ist ab 30 cm wieder zugefallen.

Tabelle B2: Beschreibung der Endoskopieaufnahmen im Feld B (Fortsetzung)

Bohrloch	Videozeit	Bohrlochbeschreibung
B-8-2	0:19 - 0:27 III	Von 5-15 cm befinden sich oben rechts Ausbrüche. Ansonsten erscheint das Gefüge kompakt. Ab 85 cm wird das Material lockerer und bei 115 cm ist das Bohrloch zugefallen.

Abbildung B3: Beschreibung der Endoskopieaufnahmen im Feld C

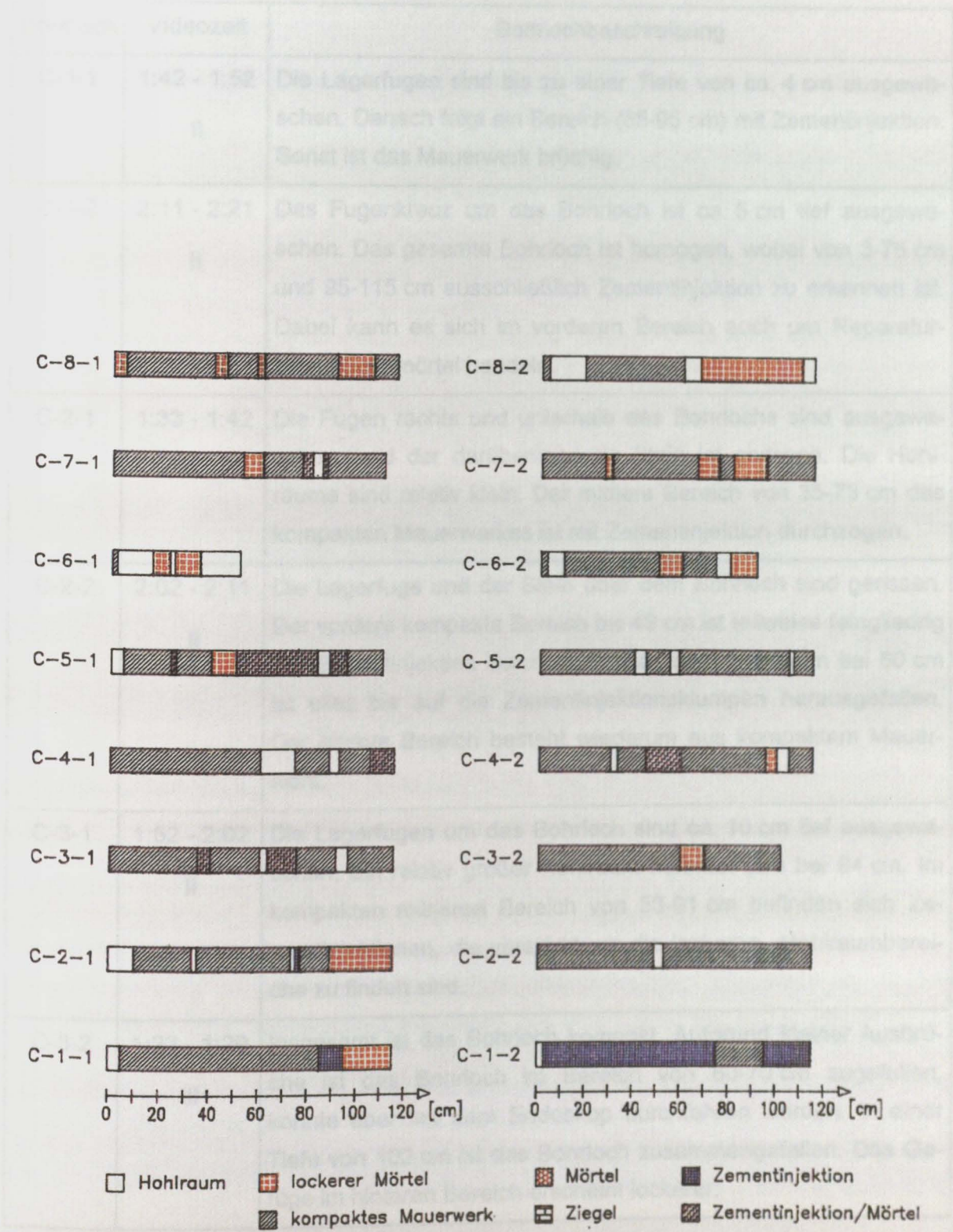


Abbildung B3: Darstellung der Endoskopieprofile im Feld C

Tabelle B3: Beschreibung der Endoskopieaufnahmen im Feld C

Bohrloch	Videozeit	Bohrlochbeschreibung
C-1-1	1:42 - 1:52 II	Die Lagerfugen sind bis zu einer Tiefe von ca. 4 cm ausgewaschen. Danach folgt ein Bereich (85-95 cm) mit Zementinjektion. Sonst ist das Mauerwerk brüchig.
C-1-2	2:11 - 2:21 II	Das Fugenkreuz um das Bohrloch ist ca. 5 cm tief ausgewaschen. Das gesamte Bohrloch ist homogen, wobei von 3-75 cm und 95-115 cm ausschließlich Zementinjektion zu erkennen ist. Dabei kann es sich im vorderen Bereich auch um Reparatur- bzw. Fugenmörtel handeln.
C-2-1	1:33 - 1:42 II	Die Fugen rechts und unterhalb des Bohrlochs sind ausgewaschen, und der darüberliegende Stein ist gerissen. Die Hohlräume sind relativ klein. Der mittlere Bereich von 35-73 cm des kompakten Mauerwerkes ist mit Zementinjektion durchzogen.
C-2-2	2:02 - 2:11 II	Die Lagerfuge und der Stein über dem Bohrloch sind gerissen. Der vordere kompakte Bereich bis 49 cm ist teilweise feingliedrig mit Zementinjektion durchzogen. Aus dem Hohlraum bei 50 cm ist alles bis auf die Zementinjektionsklumpen herausgefallen. Der hintere Bereich besteht wiederum aus kompaktem Mauerwerk.
C-3-1	1:52 - 2:02 II	Die Lagerfugen um das Bohrloch sind ca. 10 cm tief ausgewaschen. Ein relativ großer Hohlraum befindet sich bei 94 cm. Im kompakten mittleren Bereich von 53-91 cm befinden sich Zementinjektionen, die verstärkt um die lockeren Hohlraumbereiche zu finden sind.
C-3-2	1:23 - 1:29 III	Insgesamt ist das Bohrloch kompakt. Aufgrund kleiner Ausbrüche ist das Bohrloch im Bereich von 60-70 cm zugefallen, konnte aber mit dem Endoskop durchfahren werden. In einer Tiefe von 102 cm ist das Bohrloch zusammengefallen. Das Gefüge im hinteren Bereich erscheint lockerer.

Tabelle B3: Beschreibung der Endoskopieaufnahmen im Feld C (Fortsetzung)

Bohrloch	Videozeit	Bohrlochbeschreibung
C-4-1	0:07 - 0:18 III	Insgesamt erscheint das Mauerwerk kompakt. Fehlstellen befinden sich bei 60-74 cm; und eine komplett ausgewaschene, umlaufende Fuge befindet sich bei 90 cm. Der vordere Bereich scheint mit Ziegelmateriale durchsetzt zu sein. Die dunkle Stelle bei 40 cm kann auf Naturstein oder Zementinjektion beruhen, genauso wie der Bereich ab 105 cm. Bei 115 cm ist das Bohrloch wieder zugefallen.
C-4-2	2:39 - 2:47 II	Das insgesamt kompakte Gefüge zeigt leichte Fehlstellen in den Bereichen von 30-33 cm und 95-105 cm. Allerdings ist der hintere Bereich lockerer. Das bis 130 cm gebohrte Loch fällt ab 115 cm wieder zu. Zementinjektion ist im Bereich von 45-60 cm und im Bereich bis 30 cm zu erkennen. Dabei wird es sich im vorderen Abschnitt um Reparaturmörtel handeln.
C-5-1	0:00 - 0:07 III	Die Stoßfuge über dem Bohrloch ist gerissen. Es befinden sich lockere Abschnitte mit Fehlstellen in den Bereichen 40-50 cm und 83-88 cm. Außerdem ist der Mörtel an vielen Stellen mit Zementinjektion durchsetzt.
C-5-2	2:21 - 2:32 II	Das bis 130 cm gebohrte Loch fällt bei 115 cm immer wieder zu. Ansonsten erscheint das Gefüge homogen, bis auf die lockeren Fehlstellen und eine ausgewaschene, umlaufende Fuge bei 106 cm.
C-6-1	0:32 - 0:45 II	Die Stoßfuge über dem Bohrloch ist gerissen. Das Material ist sehr locker und es gibt viele Fehlstellen. Der Mörtel ist mit Ziegelmateriale durchsetzt. Die Bohrung ist bei 51 cm wieder zugefallen (Ein Ziegel versperrt die weitere Sicht.).
C-6-2	2:32 - 2:39 II	Hinter dem Verfugmörtel ist der Mörtel komplett ausgebrochen. Ab einer Tiefe von 50 cm wird das Gefüge lockerer, so daß das Bohrloch bei 80 cm wieder zufällt. Die kompakten Bereiche sind fein, aber deutlich mit Zementinjektion durchzogen.

Tabelle B3: Beschreibung der Endoskopieaufnahmen im Feld C (Fortsetzung)

Bohrloch	Videozeit	Bohrlochbeschreibung
C-7-1	0:54 - 1:01 III	Das Gefüge erscheint auf ganzer Länge homogen. Der Hohlraum zwischen 80-84 cm ist von Zementinjektion umgeben. Dahinter scheint das Mauerwerk lockerer zu werden. Bei 110 cm ist das Bohrloch wieder zugefallen.
C-7-2	1:12 - 1:22 III	Das homogene Gefüge wird ab 66 cm sehr locker, und die Bohrung ist bei 115 cm wieder zugefallen.
C-8-1	0:46 - 0:54 III	Das insgesamt kompakte Mauerwerk ist mit kleinen lockeren Bereichen durchsetzt. Ab 90 cm wird das Gefüge so locker, daß das Bohrloch bei 115 cm wieder zufällt.
C-8-2	1:01 - 1:12 III	Gleich hinter dem Verfugmörtel fehlt ein großer Teil des Fugenmaterials. Ab 60 cm beginnt ein sehr lockerer Bereich mit mehreren Fehlstellen, und bei 115 cm ist das Bohrloch zugefallen.

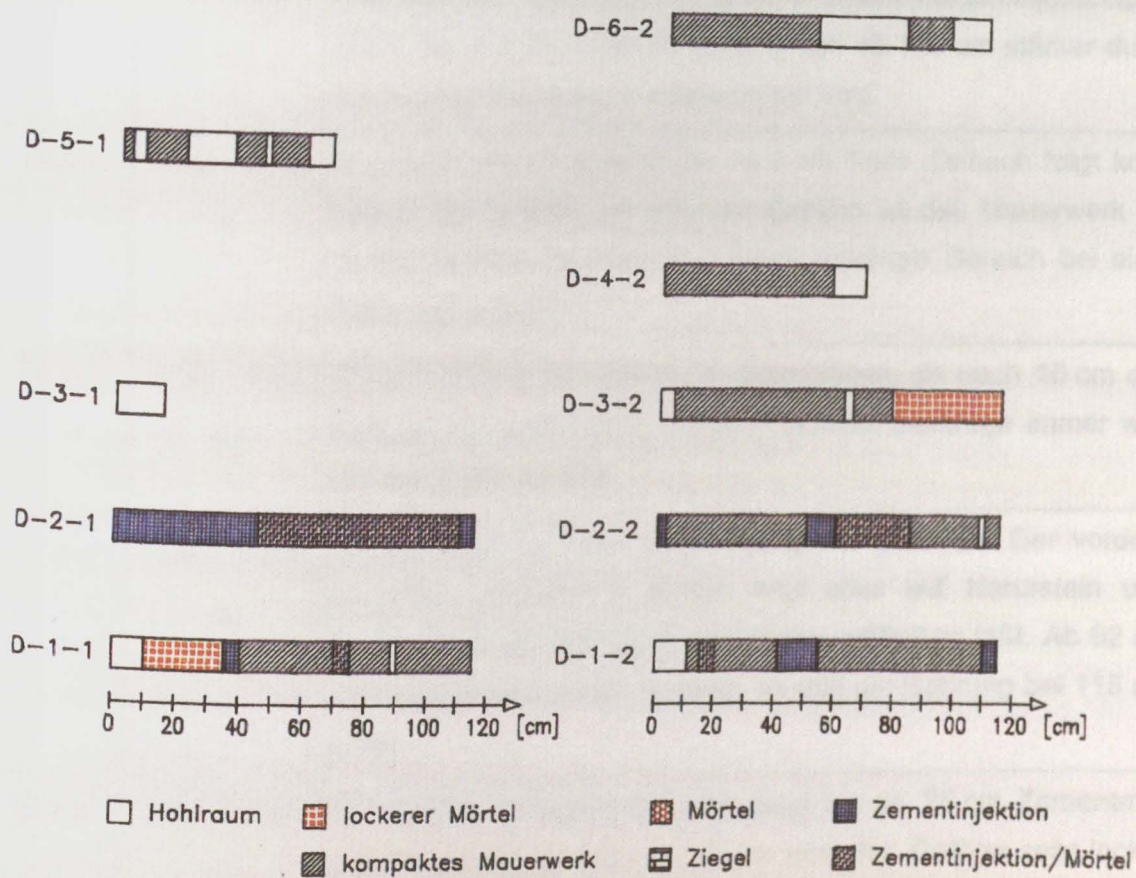


Abbildung B4: Darstellung der Endoskopieprofile im Feld D

Tabelle B4: Beschreibung der Endoskopieaufnahmen im Feld D

Bohrloch	Videozeit	Bohrlochbeschreibung
D-1-1	3:45 - 4:04 I	Das Bohrloch sitzt in einem Fugenkreuz, wobei die obere Stoßfuge komplett ausgewaschen und die rechte und linke Lagerfuge zusätzlich gerissen und von Wurzelwerk durchsetzt ist. Der vordere brüchige Bereich wird durch eine Zementinjektionsschicht bei 35-40 cm begrenzt. Ab diesem Bereich liegt kompaktes Mauerwerk mit einer Zementinjektionsschicht bei 70-75 cm und einem relativ kleinen brüchigen Bereich bei 88-90 cm vor.
D-1-2	0:00 - 0:16 II	Das kompakte Mauerwerk läßt im gesamten Bereich von 41-115 cm Zementinjektion erkennen. Auch am Bohrlocheingang ist von 6-20 cm Zementinjektion vorhanden, wobei die Vorderkante ca. 10 cm tief ausgebrochen ist.
D-2-1	3:21 - 3:21 I	Das Bohrloch befindet sich direkt in einem Zementinjektionsbereich, der nur im mittleren Bereich von 45-110 cm stärker durch kompaktes Mauerwerk unterbrochen wird.
D-2-2	3:34 - 3:45 I	Zementmörtel im Bereich bis zu 5 cm Tiefe. Danach folgt kompaktes Mauerwerk. Im mittleren Bereich ist das Mauerwerk mit Zementinjektion durchsetzt. Kleiner brüchiger Bereich bei einer Tiefe von 110 cm.
D-3-1	1:29 - 1:32 III	Diese Bohrung ist nicht zu endoskopieren, da nach 15 cm das Material der großräumig ausgebrochenen Stoßfuge immer wieder das Bohrloch füllt.
D-3-2	1:32 - 1:40 III	Die Stoßfuge ist nach oben und unten gerissen. Der vordere kompakte Bereich ist dunkel, was eher auf Naturstein und Feuchtigkeit, als auf Injektionsmaterial schließen läßt. Ab 62 cm wird das Gefüge immer lockerer, so daß die Bohrung bei 115 cm zufällt.
D-4-2	3:00 - 3:10 II	Der vordere kompakte Bereich zeigt bis ca. 25 cm Zementmaterial (Reparaturmörtel). Ab 57 cm wird das Gefüge sehr locker mit großen Ausbrüchen, und ist ab 68 cm zugefallen.

Tabelle B3: Beschreibung der Endoskopieaufnahmen im Feld D (Fortsetzung)

Bohrloch	Videozeit	Bohrlochbeschreibung
D-5-1	1:33 - 1:42 II	Das ab 60 cm zugefallene Bohrloch zeigt über seine gesamte Länge sehr viele Hohlräume. Dabei fehlt der Fugenmörtel hinter dem Verfugmörtel. Im Bereich von 20-35 cm ist die obere Stoßfuge komplett ausgebrochen.
D-6-2	2:52 - 3:00 II	Das Bohrloch sitzt direkt im Übergangsbereich der links und oben überstehenden Steine vom benachbarten Gebäude. Im vorderen kompakten Bereich bis 50 cm sind geringe Mengen an Zementinjektion zu erkennen. Danach beginnt ein lockerer Bereich mit vielen Ausbrüchen. Das ab 108 cm zugefallene Bohrloch fällt nach einem Reinigungsversuch schon ab 66 cm zu.

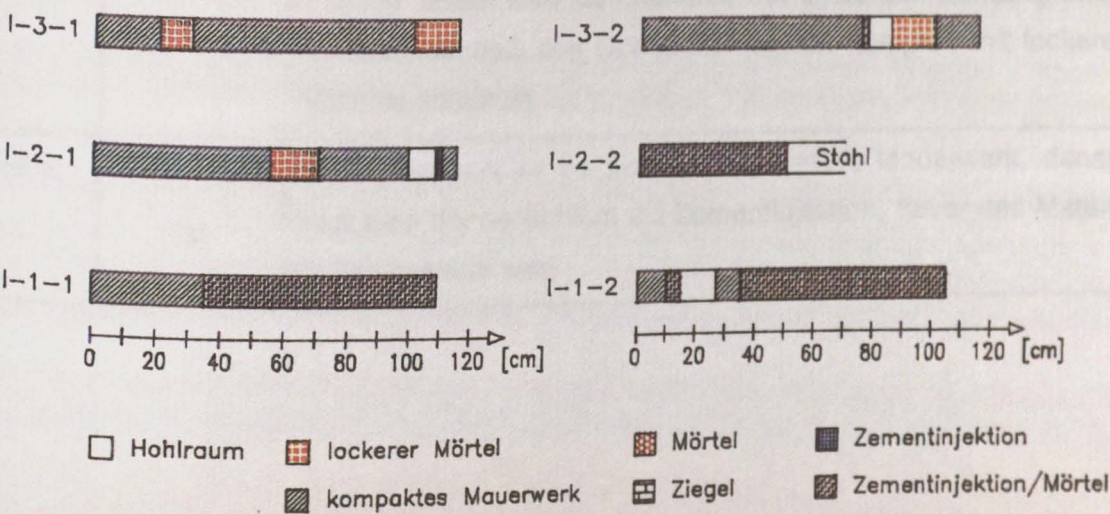


Abbildung B5: Darstellung der Endoskopieprofile im Innenbereich

Tabelle B5: Beschreibung der Endoskopieaufnahmen im Innenbereich

Bohrloch	Videozeit	Bohrlochbeschreibung
I-1-1	2:20 - 2:26 III	Die Bohrung ist bei 109 cm zugefallen. Das Gefüge ist auf gesamter Länge kompakt und relativ dunkel (Naturstein?).
I-1-2	2:12 - 2:20 III	Das an sich kompakte Mauerwerk hat zwischen 15-27 cm kleine Fehlstellen. Das Gefüge ist durchgehend dunkel; allerdings ist nicht unbedingt auf Zementinjektion zu schließen. Außerdem ist auch ein rötlicher Schimmer zu erkennen (Ziegelmaterial). Das Bohrloch ist bei 105 cm zugefallen.
I-2-1	1:58- 2:06 III	Das Bohrloch sitzt im Stein. Das Material ist in den Bereichen von 40-55 und 70-99 cm relativ dunkel, was auf Natursteinmaterial schließen läßt. Dazwischen liegt ein lockerer Abschnitt. Nach 99 cm folgt ein großer Hohlraum und lockeres Material. Die Bohrung ist bei 115 cm wieder zugefallen.
I-2-2	2:06 - 2:12 III	Diese Bohrung wurde zweimal nebeneinander durchgeführt, und man stieß in beiden Fällen bei einer Tiefe von 50 cm auf Metall. Das Gefüge hat in beiden Fällen bis dahin einen dunklen Charakter.
I-3-1	1:40 - 1:49 III	Die Bohrung sitzt im Stein und ist auf ganzer Länge sauber. Die lockeren Bereiche befinden sich zwischen 20-30 und 100-115 cm; dabei wird das Material am Ende der Bohrung immer lockerer, so daß das Bohrlochende fast komplett mit lockerem Material gefüllt ist.
I-3-2	1:49 - 1:58 III	Bis 75 cm handelt es sich um kompaktes Mauerwerk, danach folgt eine dünne Schicht mit Zementinjektion, bevor das Material immer lockerer wird.

Tabelle B6: Untersuchte Bohrmehlproben

Bohrung	Tiefe [cm]	Feuchte [M%]	Material	SO ₃ [%]	CaSO ₄ ·2H ₂ O [%]
A-1-1	0-45	20,11	G		
A-1-1	50-65	9,56	G		
A-1-1	65-80	12,80	G		
A-1-1	80-120	7,30	G	31,29	67,29
A-3-2	0-100	5,98	G		
A-3-2	100-140	3,39	G		
A-5-1	0-45	1,91	G		
A-5-1	50-65	5,29	G	16,21	34,86
A-5-1	65-80	10,54	G	6,98	15,01
A-5-1	80-130	10,24	G		
A-7-2	0-45	8,09	G	9,78	21,03
A-7-2	45-80	7,76	G		
B-1-2	0-45	8,76	G		
B-1-2	45-80	10,66	G		
B-5-1	0-40	5,04	-		
B-5-1	40-80	0,87	-		
C-1-2	10-20	16,88	G		
C-1-2	20-60	11,72	G		
C-1-2	60-80	9,90	G		
C-1-2	80-100	12,45	G		
C-3-2	0-45	4,69	-		
C-3-2	40-80	11,51	G		
C-3-2	80-100	8,80	G		
D-1-2	10-20	1,14	-		
D-1-2	20-60	10,49	-		
D-1-2	60-80	9,61	G		
D-1-2	80-100	6,47	G	27,07	58,21

Röntgenfeinstrukturanalyse: Beugungsdiagramm

Meßtittel: run95-3

Antragsteller: BMFT

Projekt : Runneburg

Probe : Nr. 6 A 5.1 65-80 <40 µm

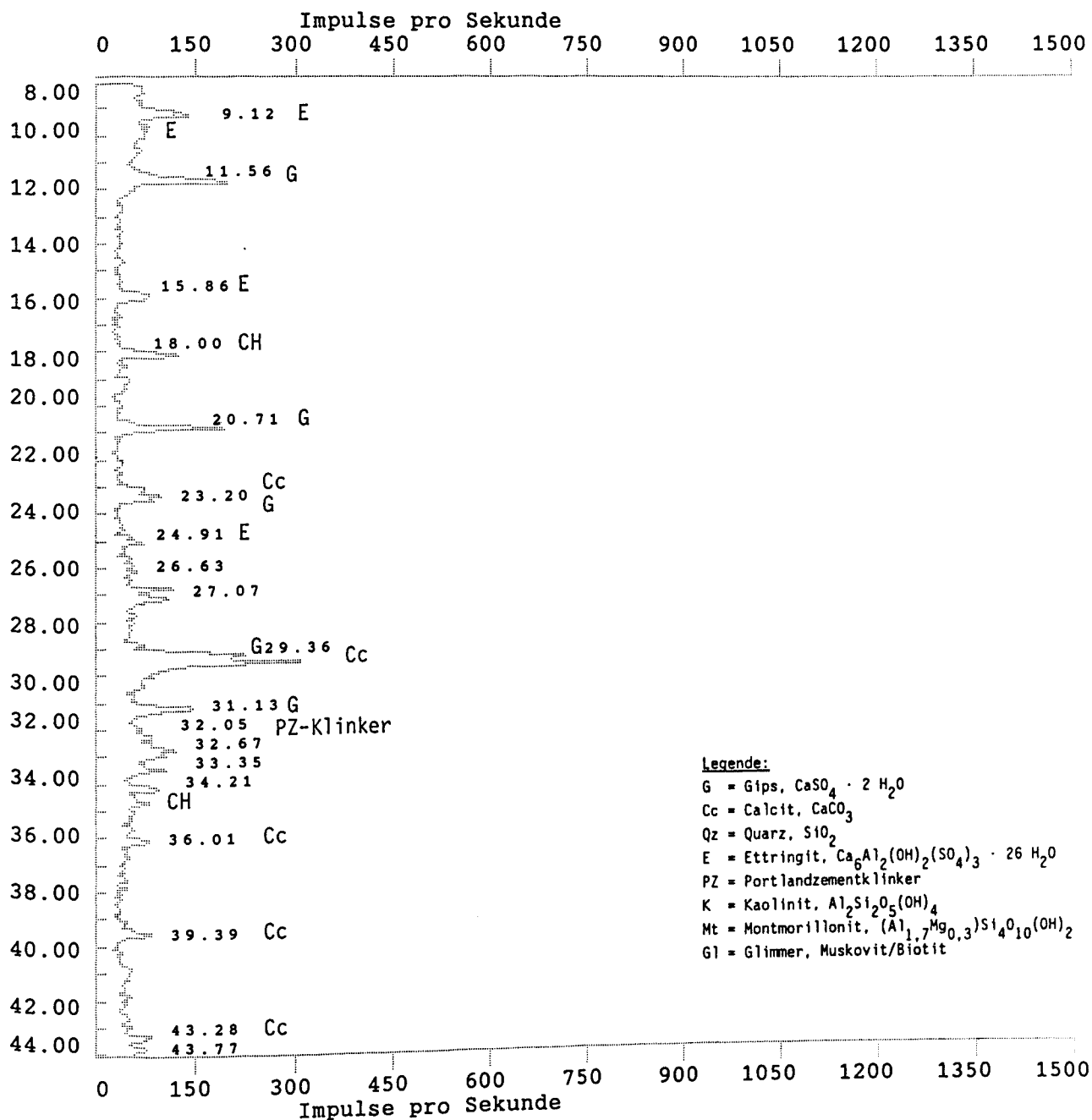


Abbildung B6: Beugungsdiagramm der Röntgenfeinstrukturanalyse
 Probe A-5-1 (65-80 cm)

Röntgenfeinstrukturanalyse: Beugungsdiagramm

Meßtiter: run95-4

Antragsteller: BMFT

Projekt : Runneburg Mörtel

Probe : Nr.7 A 5.1 80-130 <40 µm

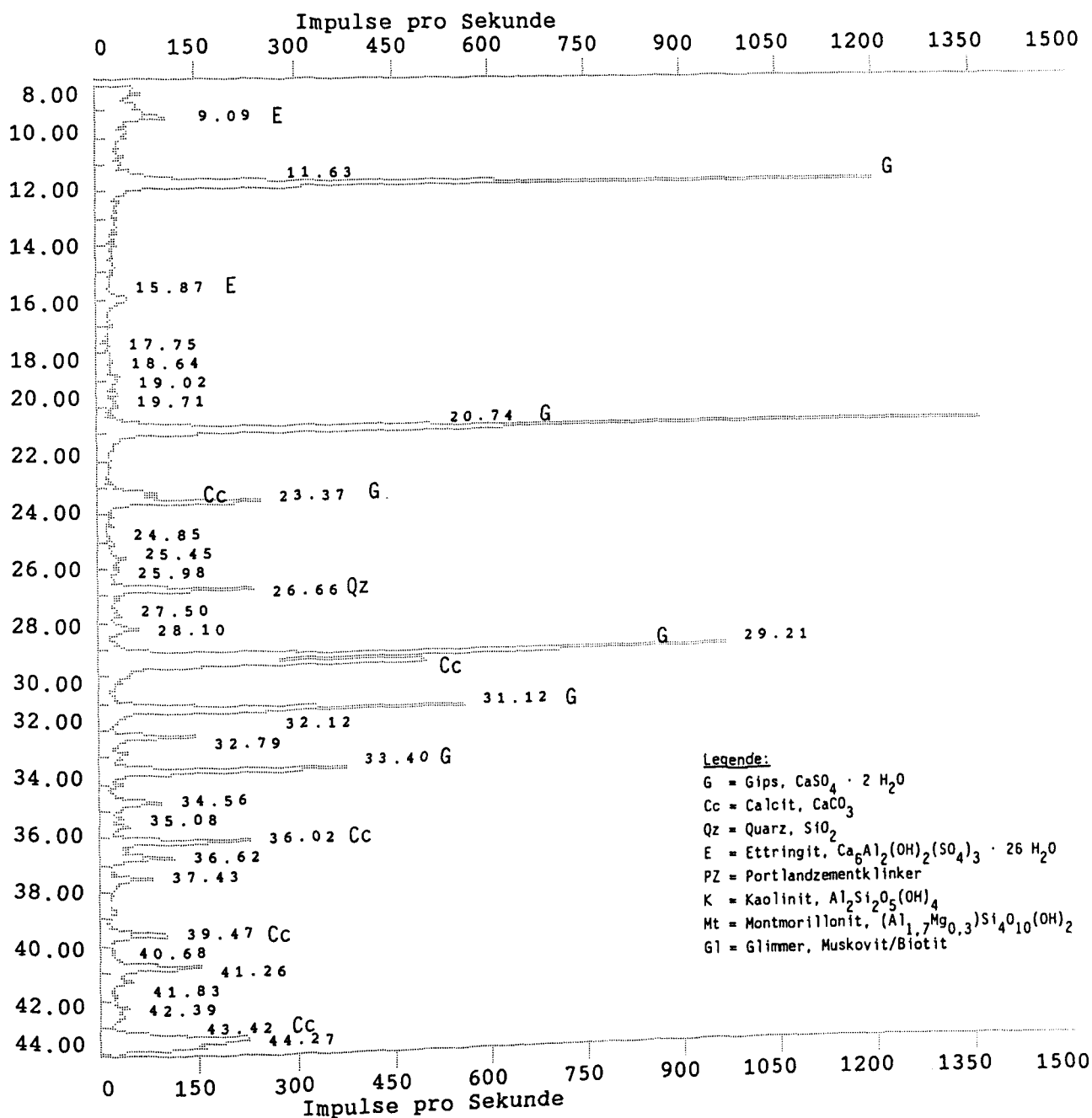


Abbildung B7: Beugungsdiagramm der Röntgenfeinstrukturanalyse
 Probe A-5-1 (80-130 cm)

Röntgenfeinstrukturanalyse: Beugungsdiagramm

Meßtittel: Run95-1

Antragsteller: BMFT

Projekt : Runneburg / Endoskopie

Probe : Nr.2 A7.2 0-45 < 40 µm

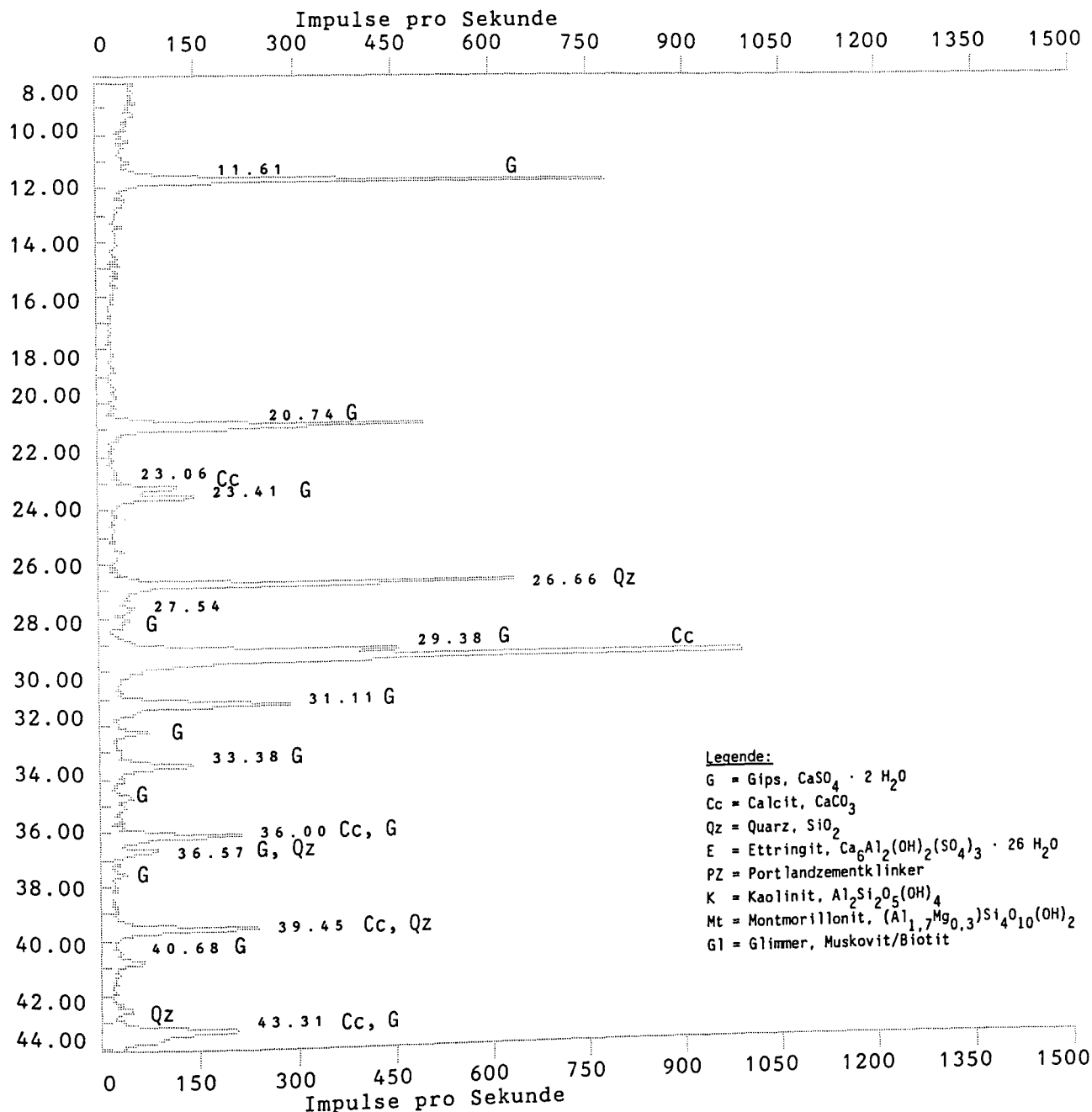


Abbildung B8: Beugungsdiagramm der Röntgenfeinstrukturanalyse
 Probe A-7-2 (0-45 cm)

Röntgenfeinstrukturanalyse: Beugungsdiagramm

Meßtittel: run95-2

Antragsteller: BMFT
 Projekt : Runneburg
 Probe : Nr. 3 A 7.2 50-80 < 40µm

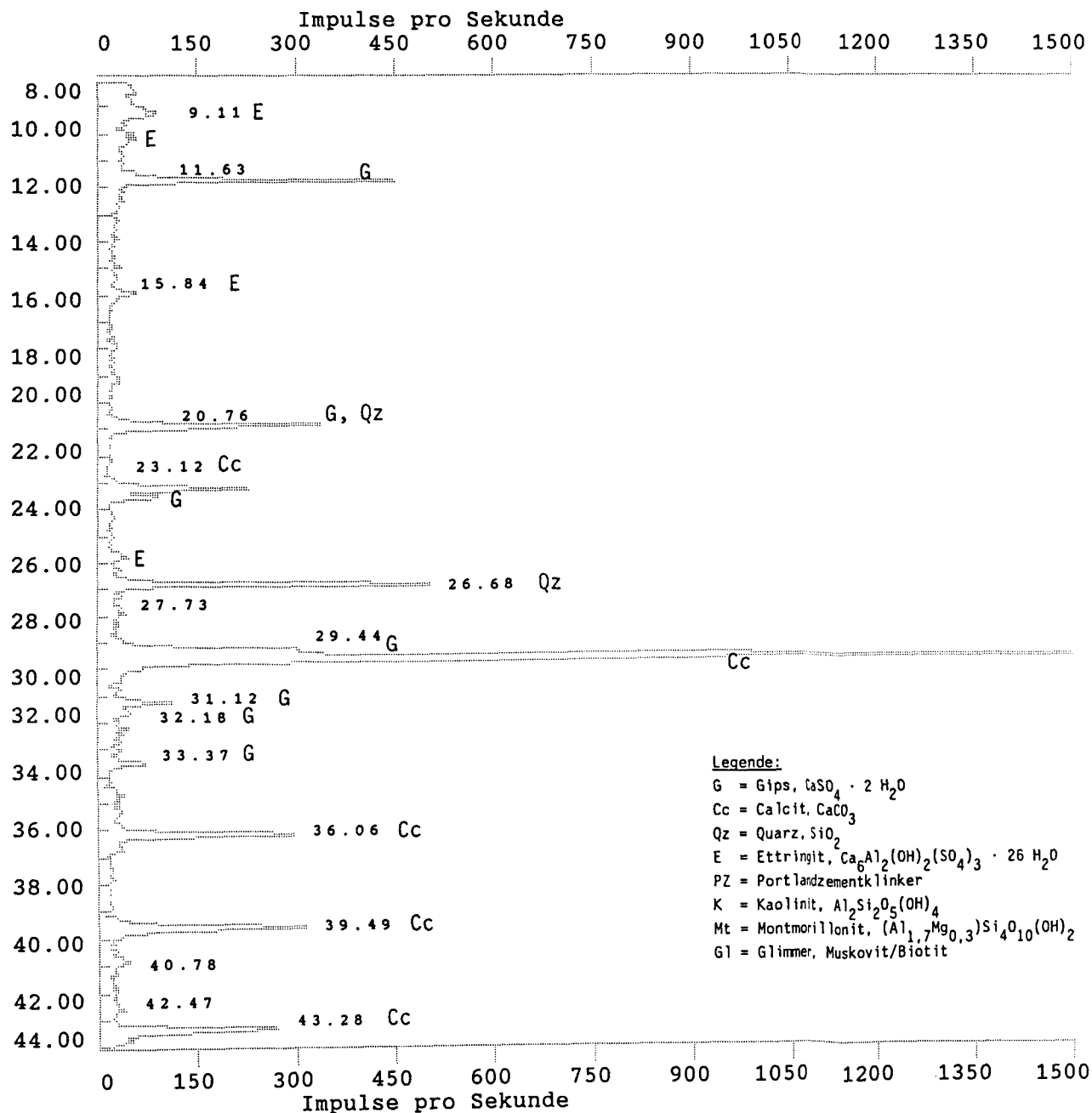
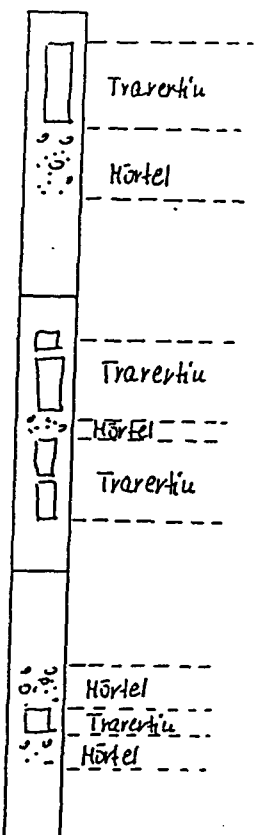


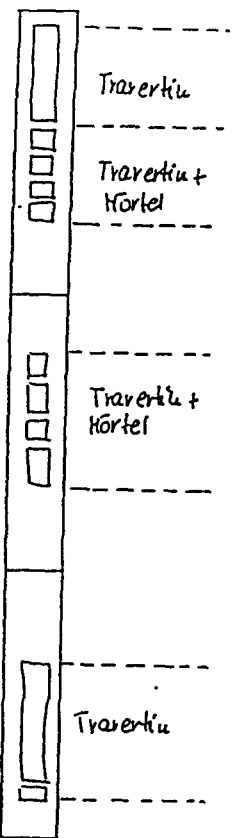
Abbildung B9: Beugungsdiagramm der Röntgenfeinstrukturanalyse
 Probe A-7-2 (50-80 cm)

Tabelle B7: Quantitative Zusammensetzung der Bohrkernproben

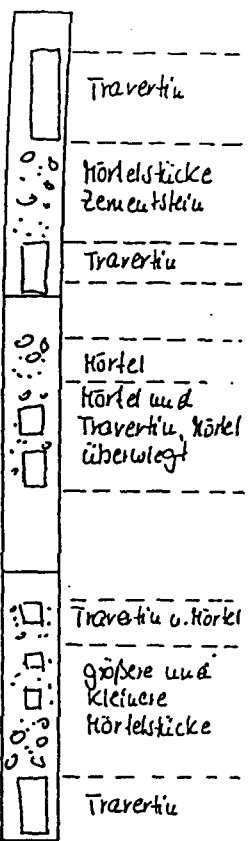
	A-7-2 0-45 cm	A-7-2 50-80 cm	A-5-1 65-80 cm	A-5-1 80-130cm
Gips	++++	++++	++	++++
Calcit	++++	+	++	++
Quarz	++	+	+	+
Ettringit	-	+	+	+
PZ	-	-	+	-
Glimmer	-	-	-	-
Kaolinit	-	-	-	-
Montmorillonit	-	-	-	-



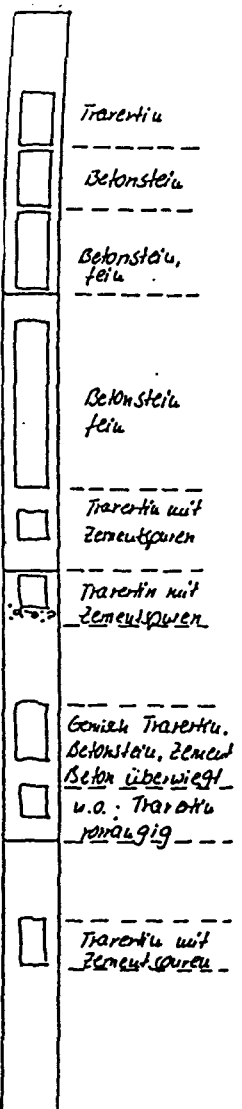
S 41 DG
l = 2,00 m



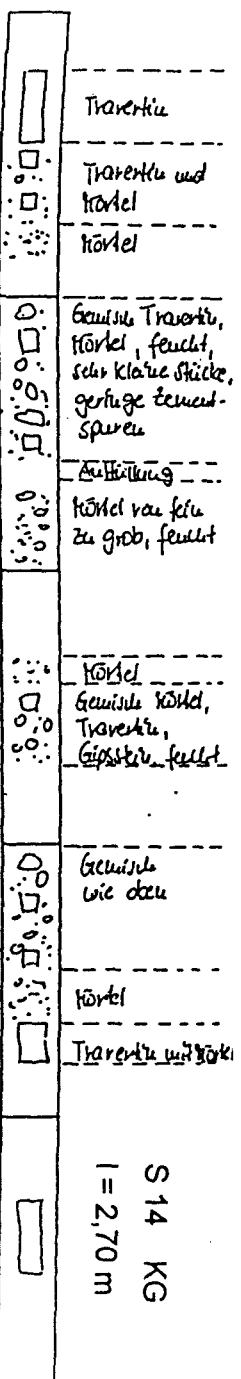
S 37 II. OG
l = 1,95 m



S 32 I. OG
l = 2,05 m



S 23 EG
l = 2,20 m



S 14 KG
l = 2,70 m

Abbildung C1: Bohrkernquerschnitte aus der Turmordwand [3]

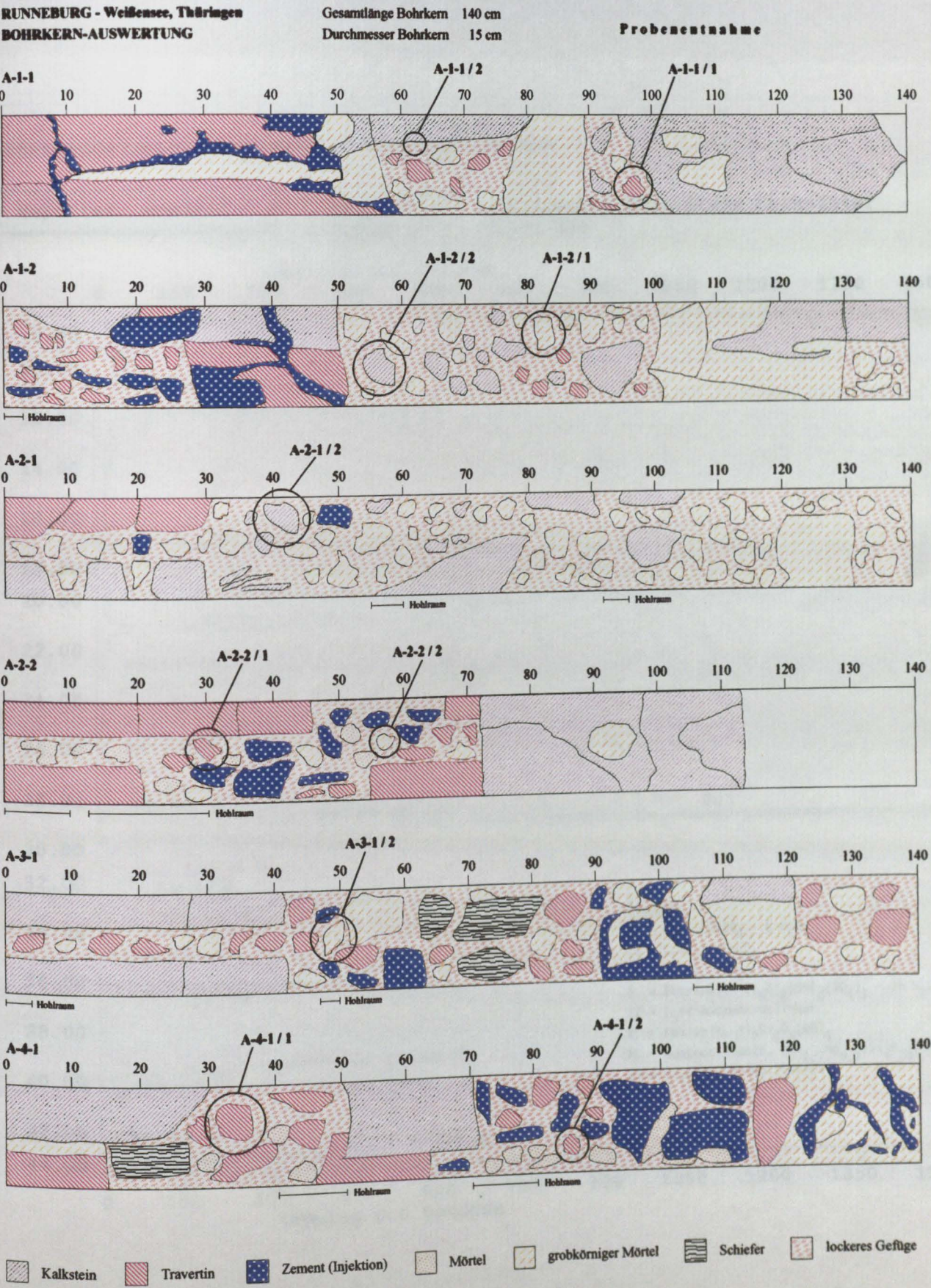


Abbildung C2: Bohrkernquerschnitte aus der Turmnordwand

Röntgenfeinstrukturanalyse: Beugungsdiagramm

Meßtittel: run95-7	Antragsteller: BMFT
	Projekt : Runneburg Mauerstein Kalksinter
	Probe : A-1-1/1

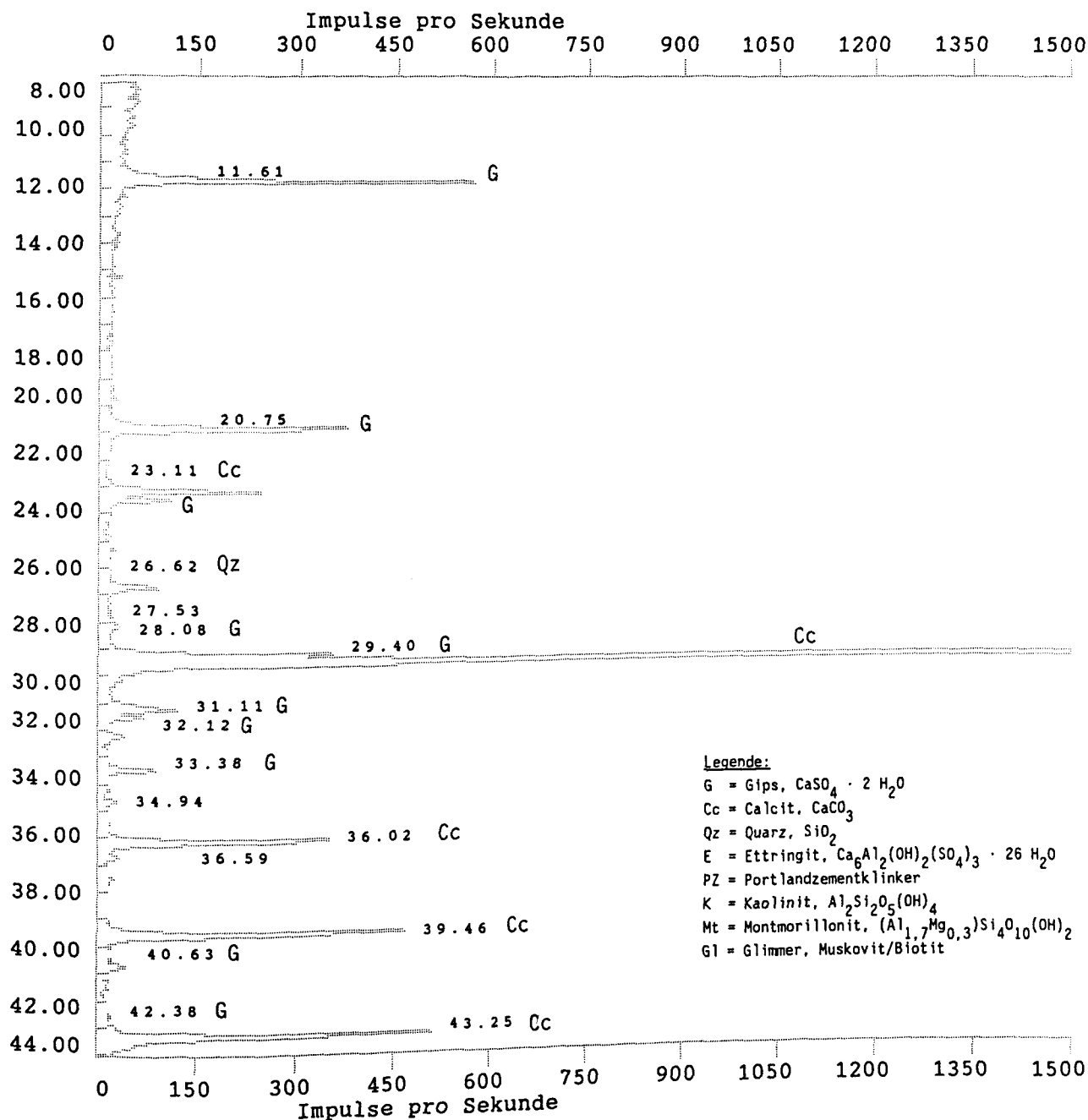


Abbildung C3 Beugungsdiagramm der Röntgenfeinstrukturanalyse
Probe A-1-1/1

Röntgenfeinstrukturanalyse: Beugungsdiagramm

Meßtittel: run95-8

Antragsteller: BMFT

Projekt : Runneburg

Probe : A-1-1/2 weicher Glimmerschiefer

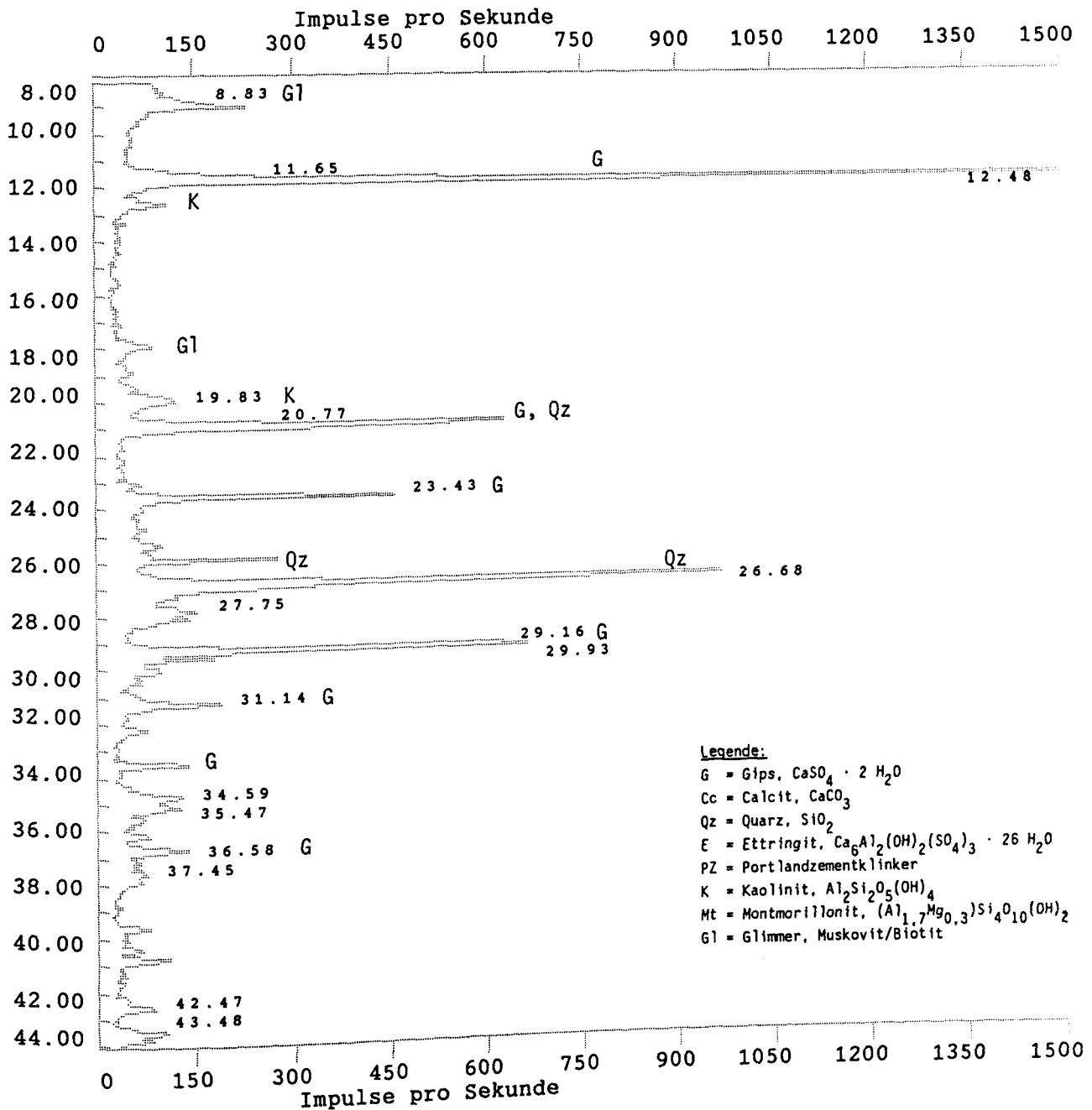


Abbildung C4: Beugungsdiagramm der Röntgenfeinstrukturanalyse
 Probe A-1-1/2

Röntgenfeinstrukturanalyse: Beugungsdiagramm

Meßtittel: run95-5

Antragsteller: BMFT
 Projekt : Runneburg
 Probe : A-A-2/1 Mörtel

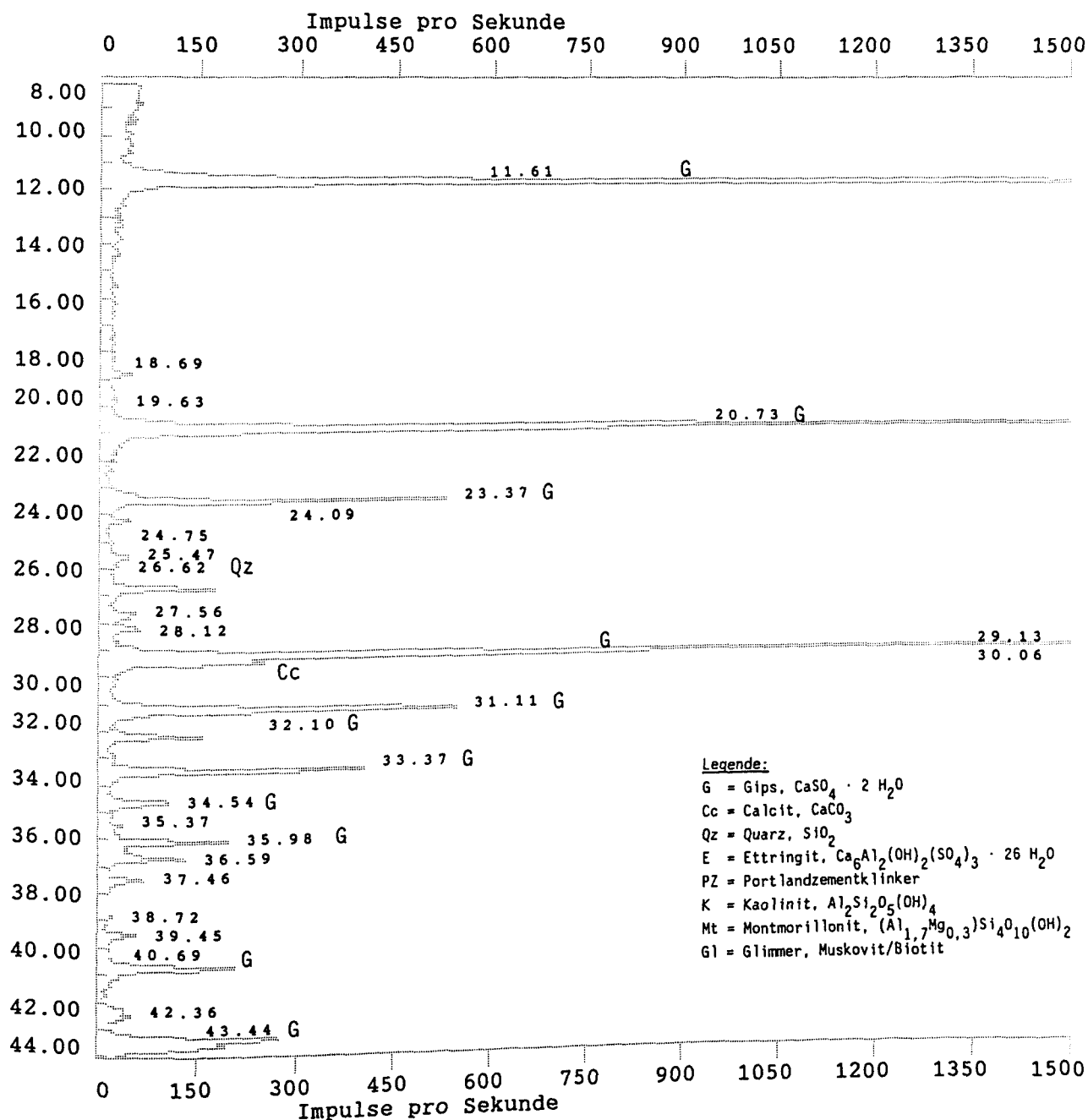


Abbildung C5: Beugungsdiagramm der Röntgenfeinstrukturanalyse
 Probe A-1-2/1

Röntgenfeinstrukturanalyse: Beugungsdiagramm

Meßtittel: run95-9

Antragsteller: BMFT

Projekt : Runneburg

Probe : A-1-2/2 Gipskristalle im Tonschiefer

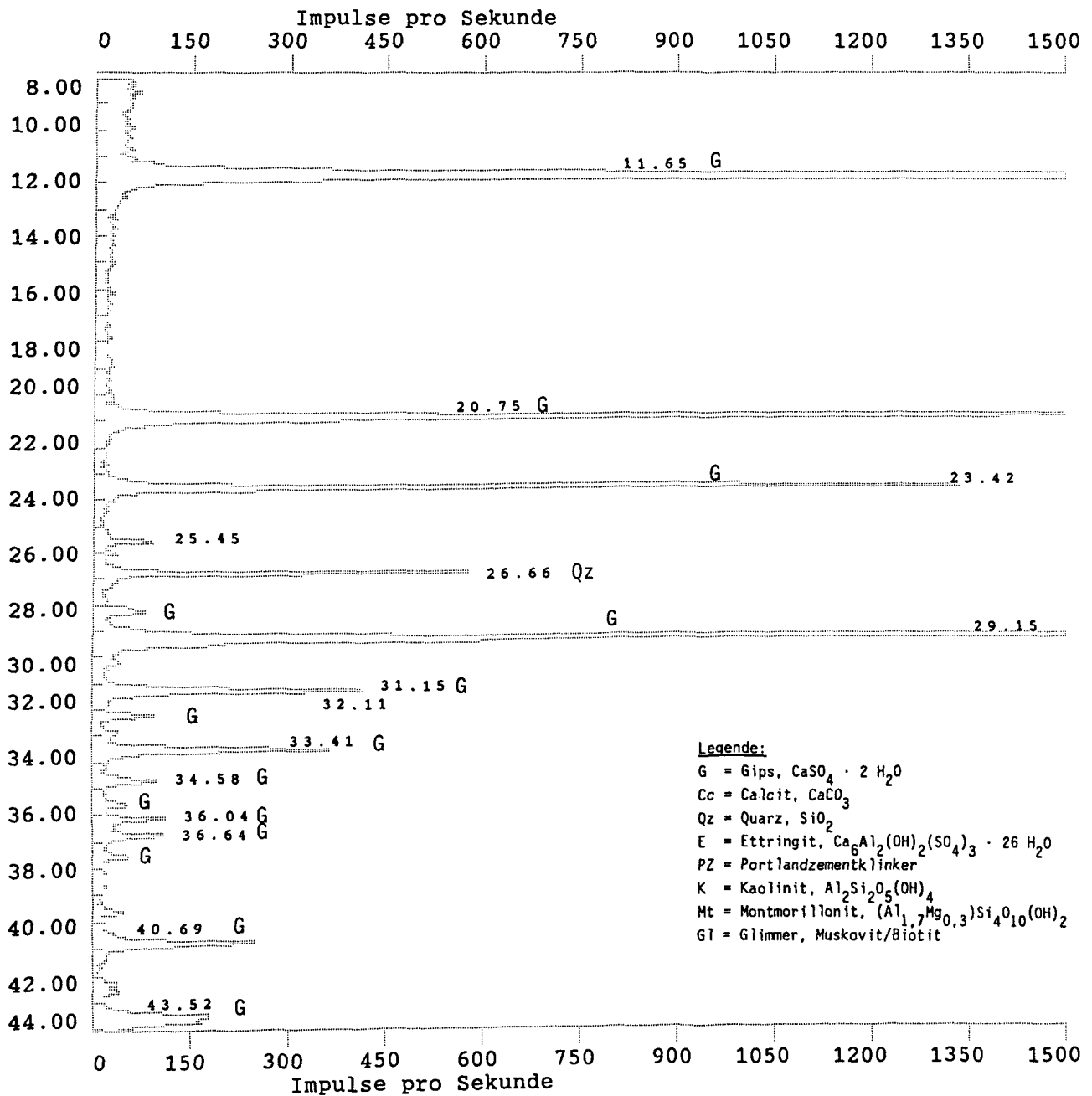


Abbildung C6: Beugungsdiagramm der Röntgenfeinstrukturanalyse
 Probe A-1-2/2

Röntgenfeinstrukturanalyse: Beugungsdiagramm

Meßtittel: run95-10

Antragsteller: BMFT

Projekt : Runneburg

Probe : A-2-1/1 weicher grauer Gipsstein

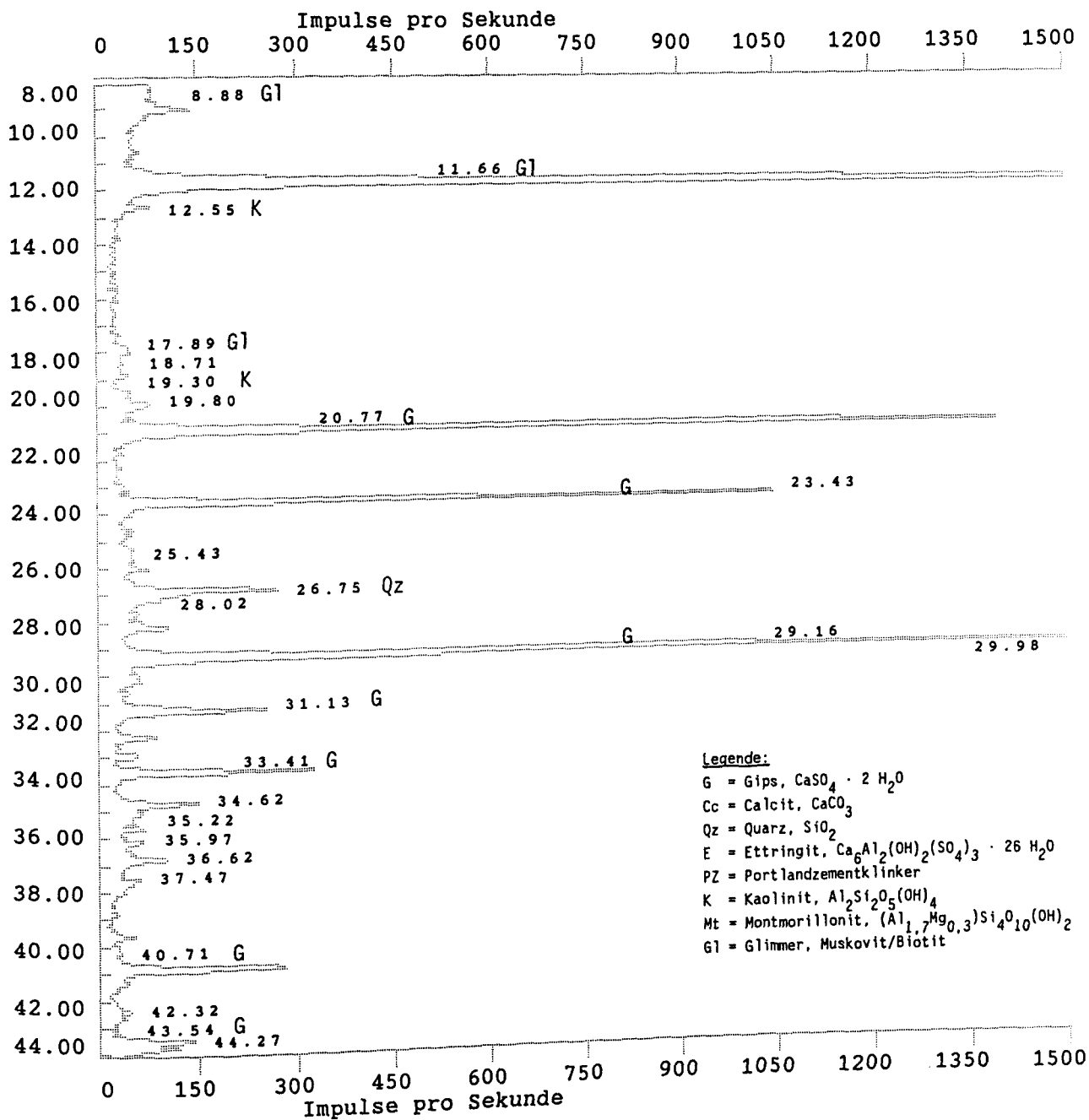


Abbildung C7: Beugungsdiagramm der Röntgenfeinstrukturanalyse
 Probe A-2-1/1

Röntgenfeinstrukturanalyse: Beugungsdiagramm

Meßtittel: run95-11

Antragsteller: BMFT

Projekt : Runneburg

Probe : A-2-2/1 Mörtel an Kalksinter

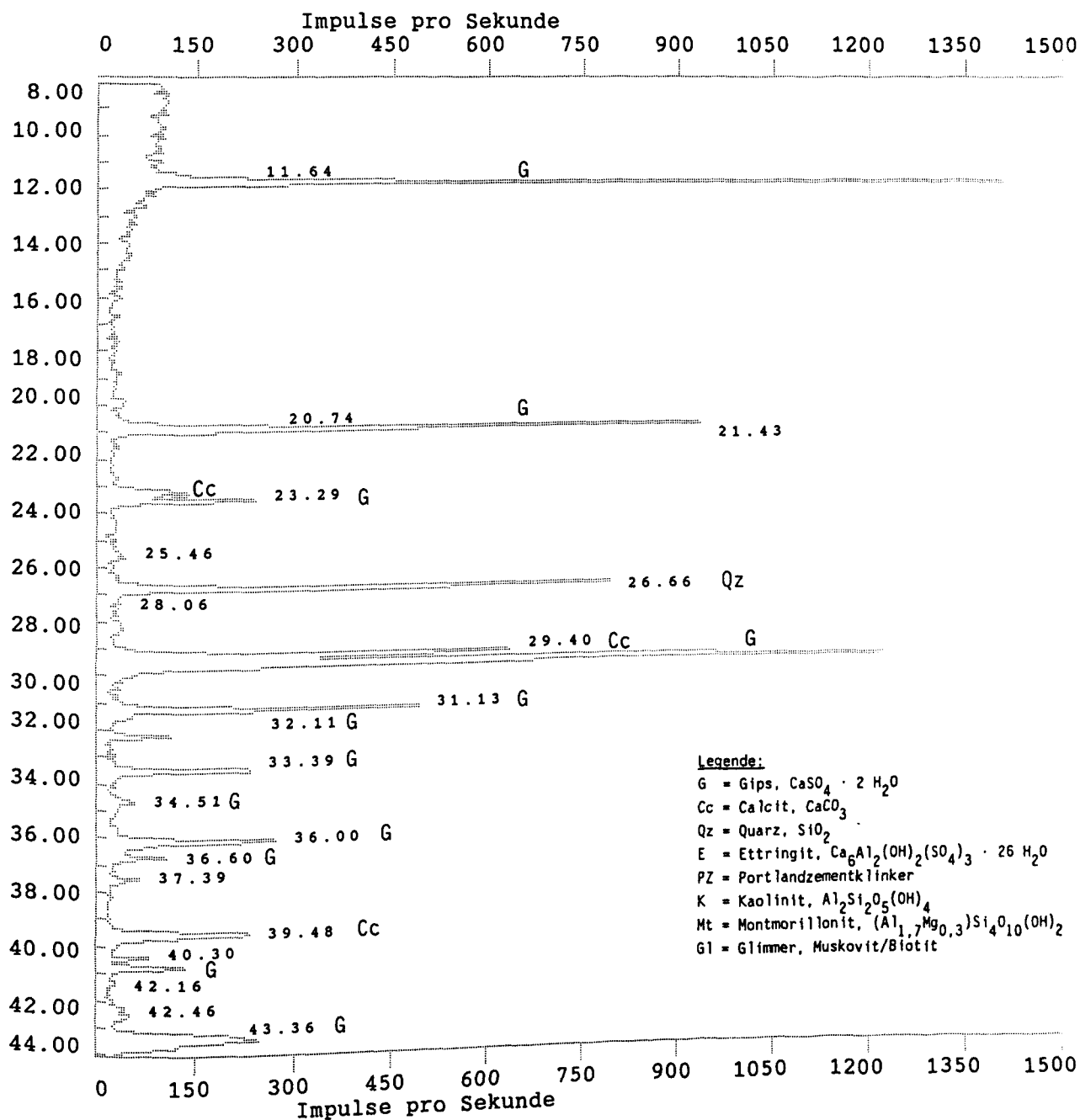


Abbildung C8: Beugungsdiagramm der Röntgenfeinstrukturanalyse
 Probe A-2-2/1

Röntgenfeinstrukturanalyse: Beugungsdiagramm

Meßtitel: run95-6

Antragsteller: BMFT
 Projekt : Runneburg Bohrkern
 Probe : A-2-2-/2

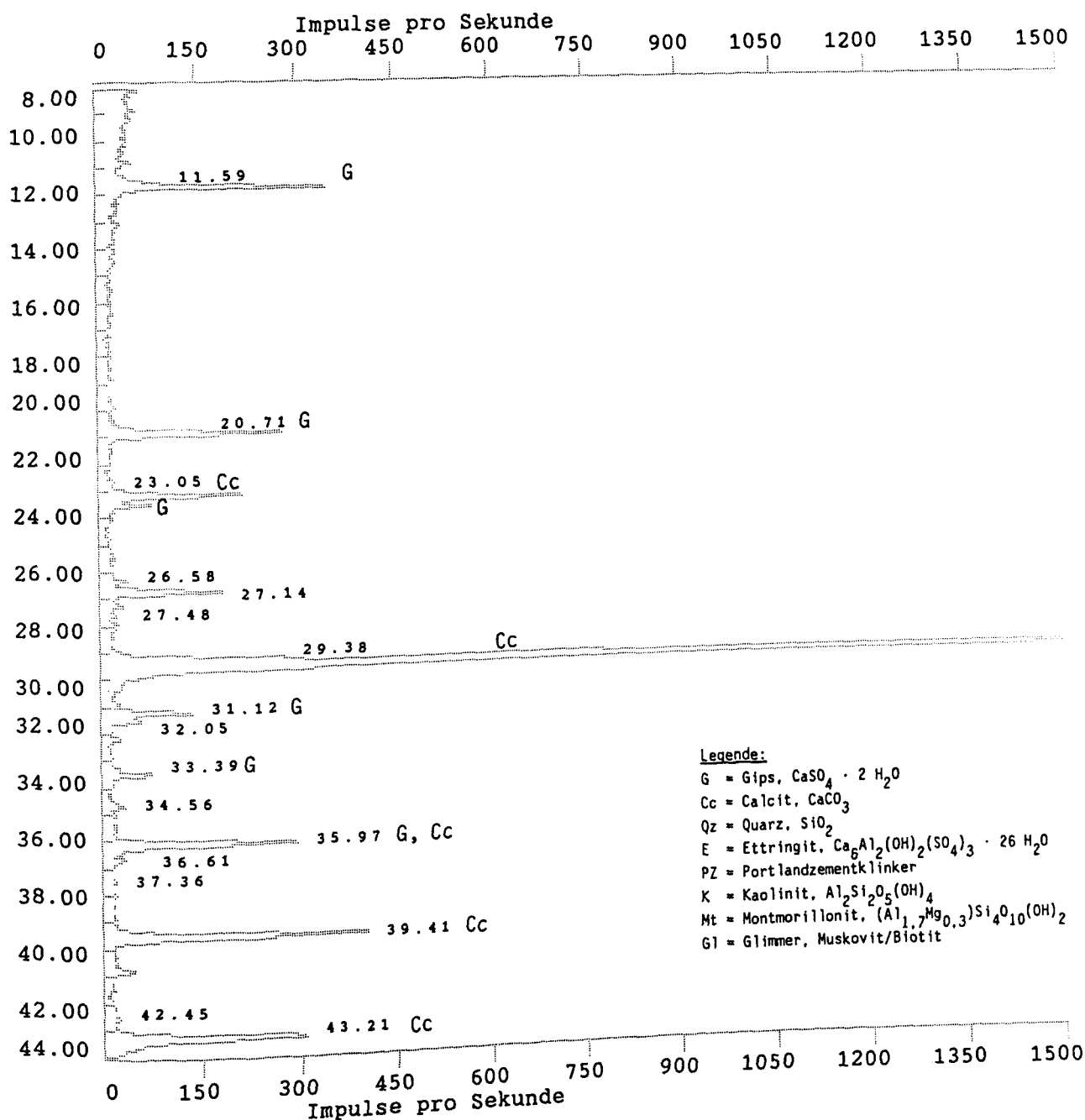


Abbildung C9: Beugungsdiagramm der Röntgenfeinstrukturanalyse
Probe A-2-2/2

Röntgenfeinstrukturanalyse: Beugungsdiagramm

Meßtittel: run95-12

Antragsteller: BMFT

Projekt : Runneburg

Probe : A-3-1/1 Gipsmörtel

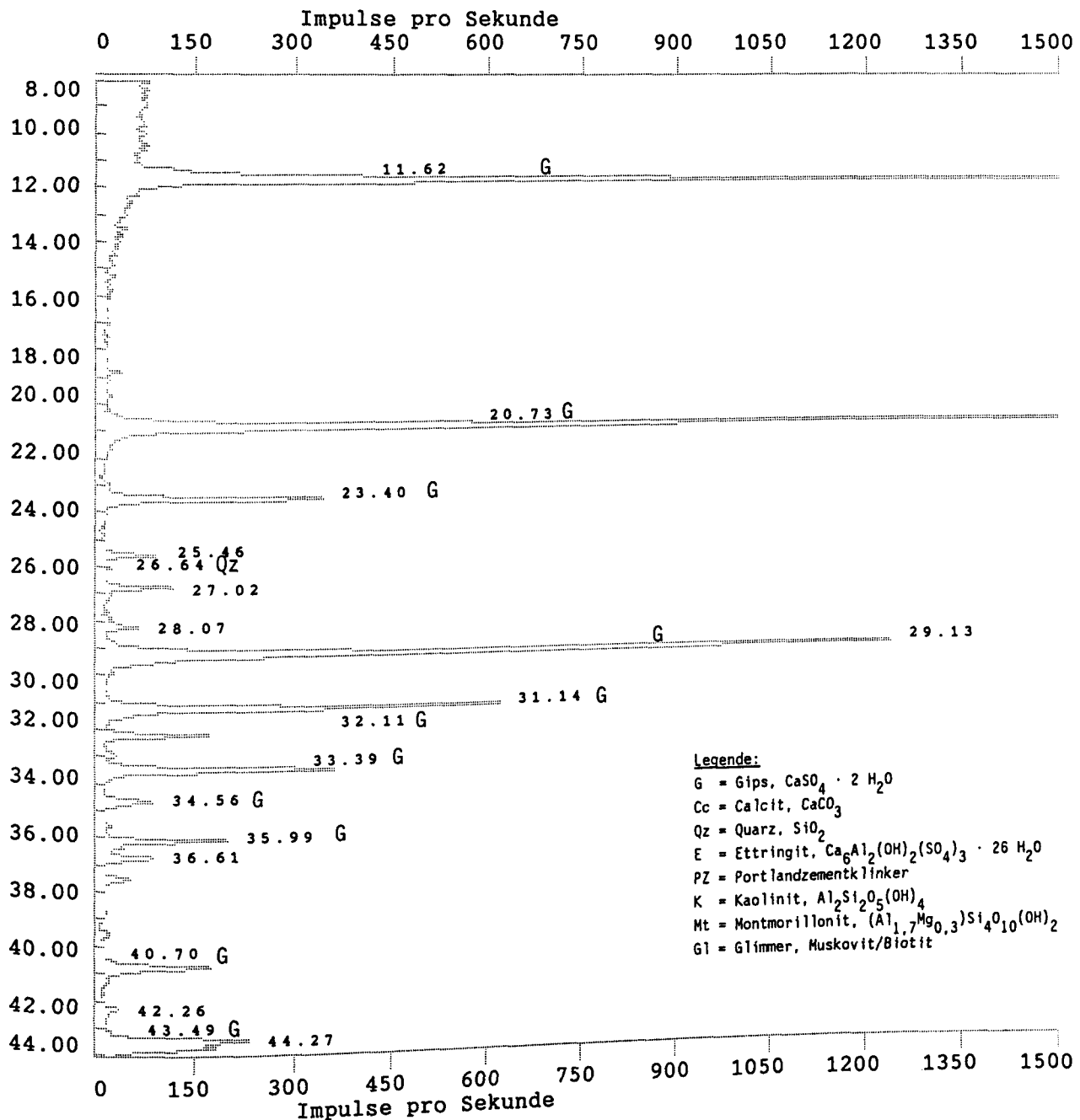


Abbildung C10: Beugungsdiagramm der Röntgenfeinstrukturanalyse
 Probe A-3-1/1

Röntgenfeinstrukturanalyse: Beugungsdiagramm

Meßtittel: run95-13

Antragsteller: BMFT
 Projekt : Runneburg
 Probe : A-4-1/1 Kalkstein

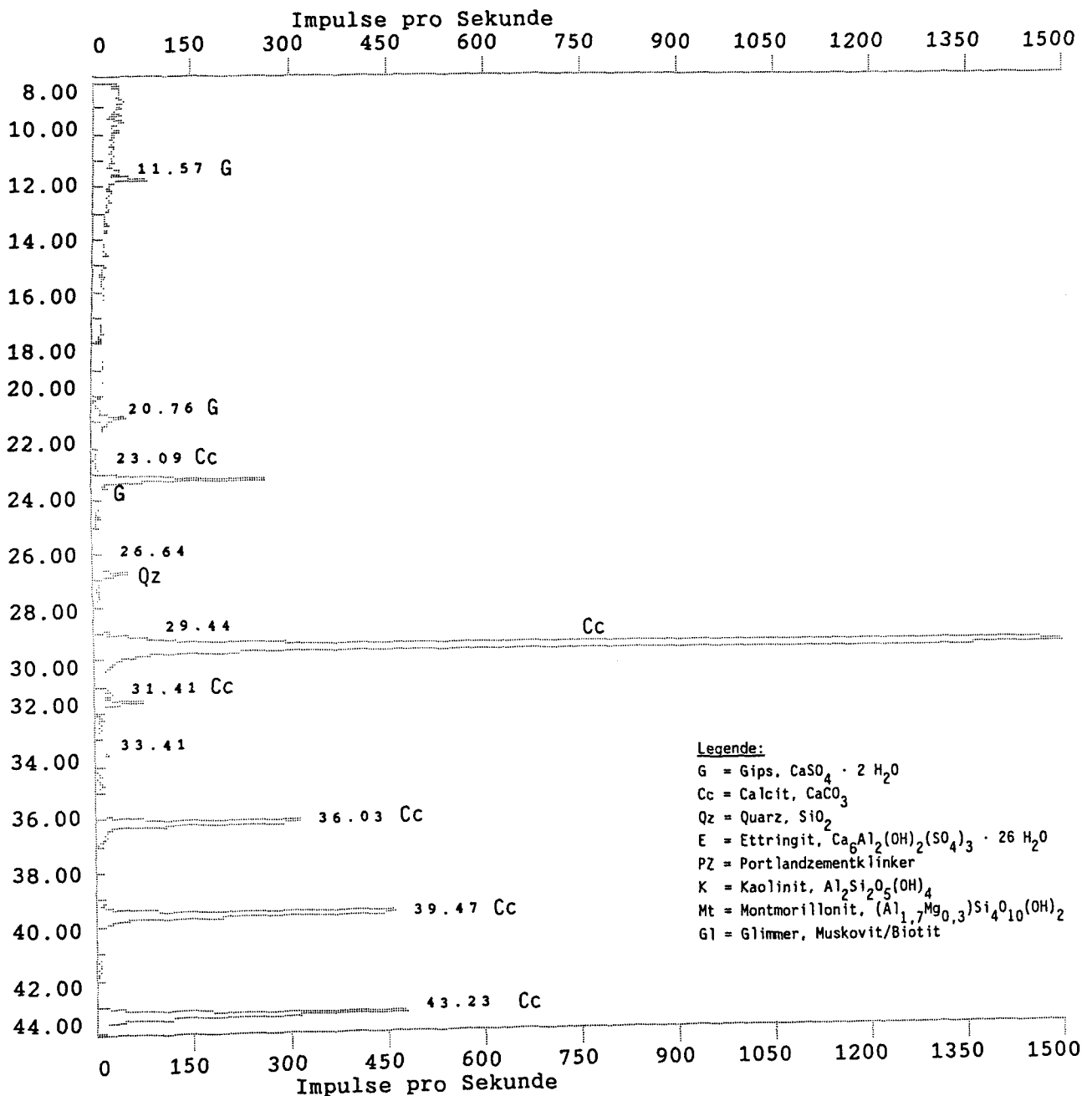


Abbildung C11: Beugungsdiagramm der Röntgenfeinstrukturanalyse
 Probe A-4-1/1

Röntgenfeinstrukturanalyse: Beugungsdiagramm

Meßtittel: run95-14

Antragsteller: BMFT

Projekt : Runneburg

Probe : A-4-1/2 Travertin Kalksinter

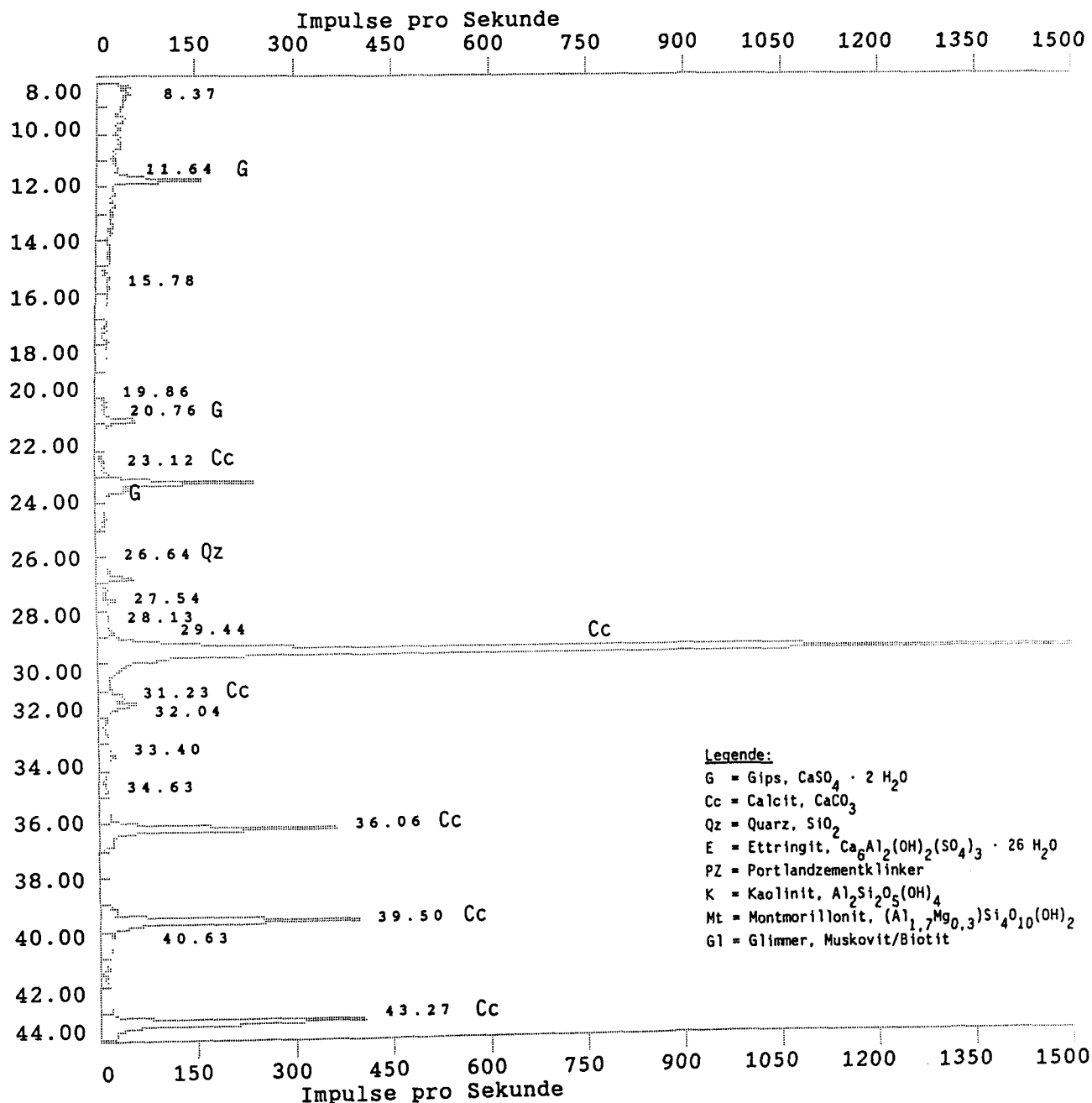


Abbildung C12: Beugungsdiagramm der Röntgenfeinstrukturanalyse
 Probe A-4-1/2

Tabelle D2: Quantitative Zusammensetzung der Bohrmehlproben

	A-1-1 1	A-1-1 2	A-1-2 1	A-1-2 2	A-2-1 1	A-2-2 1	A-2-2 2	A-3-1 1	A-4-1 1	A-4-1 2
Gips	+	++++	++++	++++	++++	++++	+	++++	+	+
Calcit	++++	-	+	-	-	++	++++	-	++++	++++
Quarz	+	+	+	+	+	++	+	+	+	+
Ettringit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Glimmer	-	++	-	-	+	-	-	-	-	-
Kaolimit	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-
Montmorillonit	-	++	-	-	+	-	-	-	-	-



Abbildung C13: Überbohrtes Endoskopielloch



Abbildung C14: Kernbohrung A-1-1

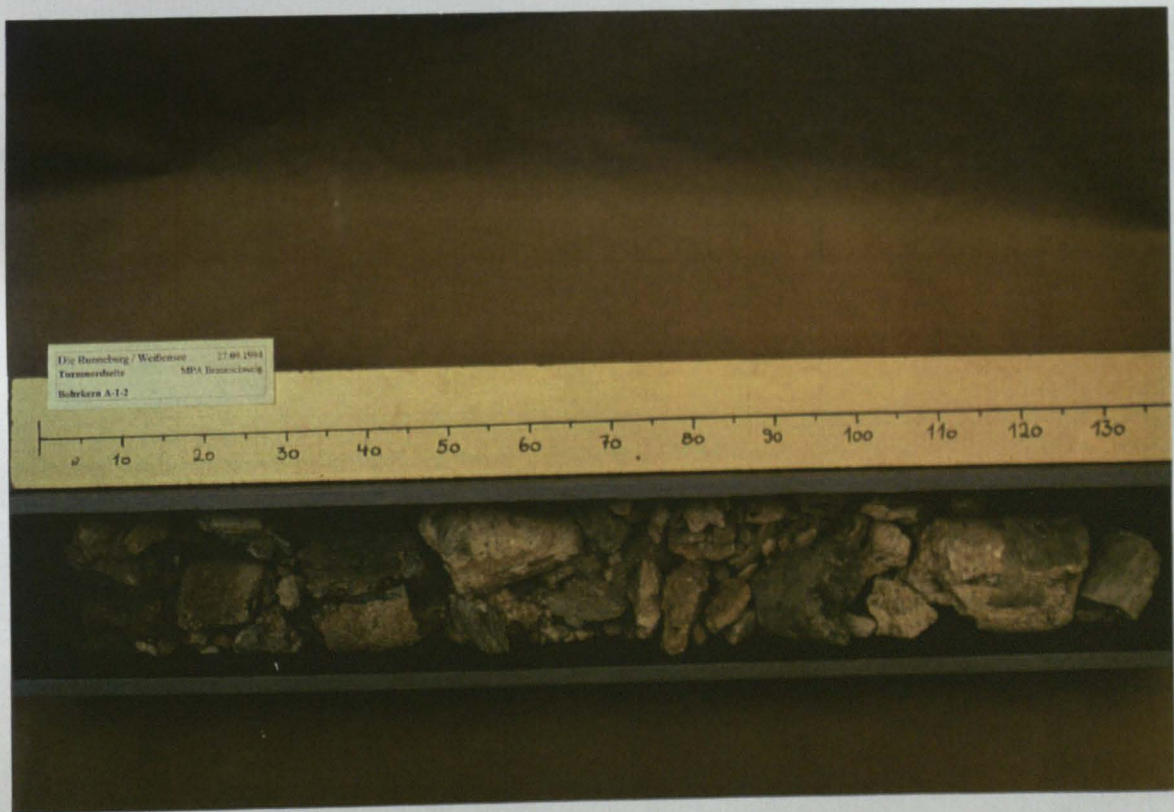


Abbildung C15: Kernbohrung A-1-2

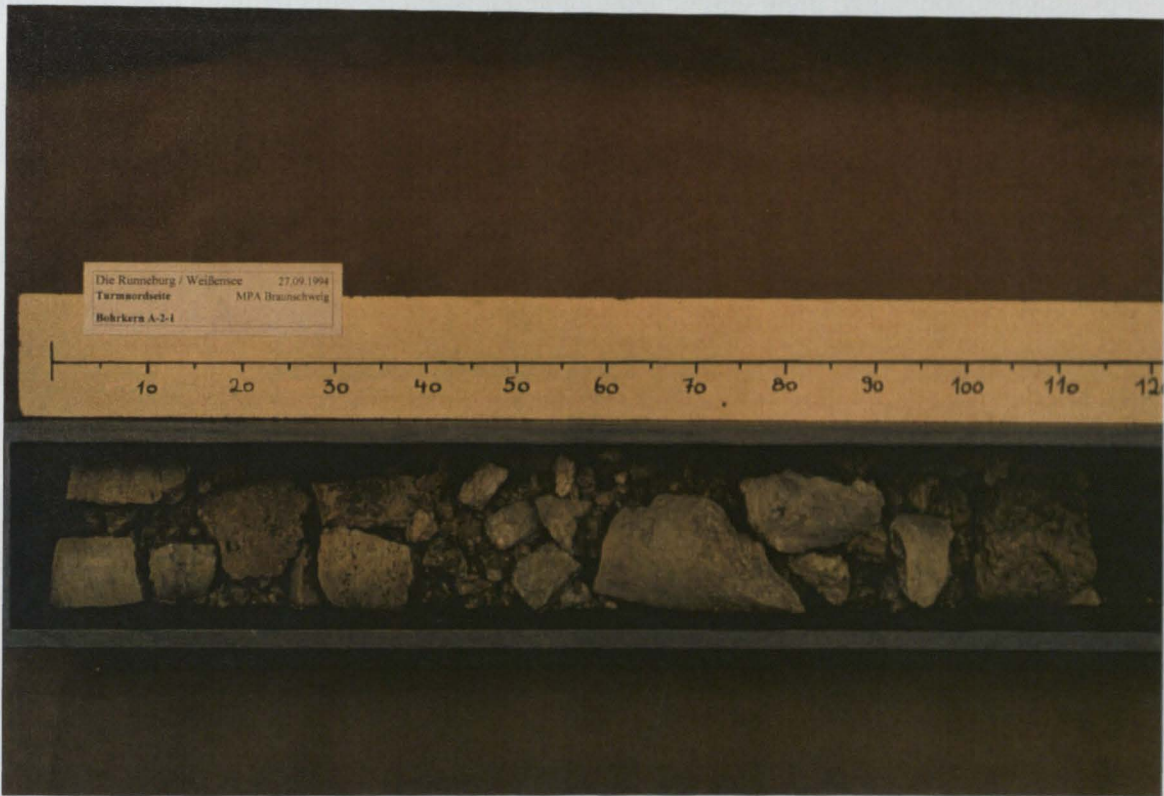


Abbildung C15: Kernbohrung A-2-1



Abbildung C16: Kernbohrung A-2-2



Abbildung C17: Kernbohrung A-3-1

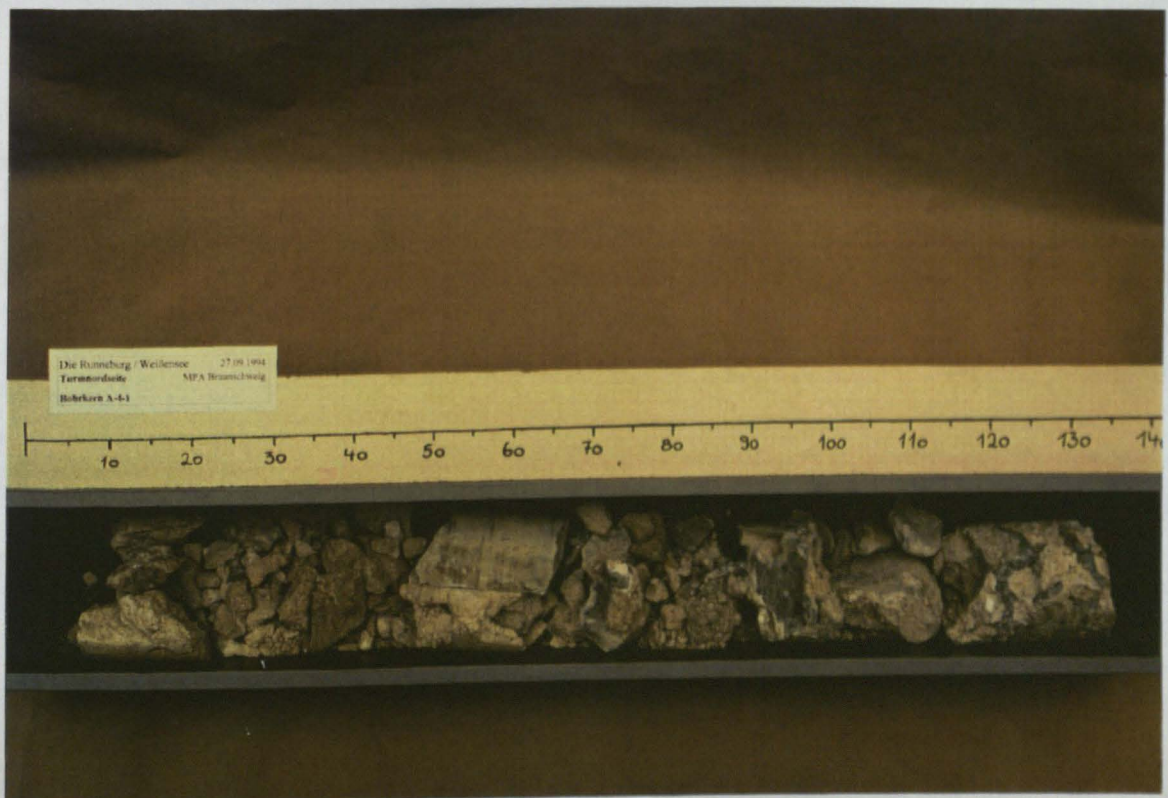


Abbildung C18: Kernbohrung A-4-1